



# **Universidade Federal do Rio de Janeiro**

**CCMN - Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza**

**Instituto de Geociências**

**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA GASOLINA PURA E DA  
GASOLINA COM ETANOL NO MEIO POROSO CONFINADO E  
NO POÇO DE MONITORAMENTO.**

**Thiago Marques Baptista Teixeira**

**ORIENTADORES:  
EMÍLIO VELLOSO BARROSO  
EURÍPEDES DO AMARAL VARGAS JÚNIOR**

**RELATÓRIO DE ESTÁGIO DE CAMPO IV**

**RIO DE JANEIRO  
ABRIL DE 2005**

**Índice**

1 – Introdução	5
2 – Objetivos	8
3 – Interação entre água, solo e hidrocarbonetos	9
3.1 – Zonas do solo	10
3.2 – Características da gasolina	14
3.2.1- Principais propriedades físicas dos fluidos	16
3.3 – Fases da contaminação	19
4 – Metodologia e Material de estudo	23
5 – Ensaios	33
5.1 – Ensaio 1	33
5.2 – Ensaio 2	36
5.3 – Ensaio 3	41
5.4 – Ensaio 4	50
6 – Discussão dos resultados	57
7 – Conclusões	60
8 – Trabalhos Futuros	62
9 – Bibliografia	63
10 – Anexos	65

Índice de figuras

Figura 1- Remoção de tanques de combustível	7
Figura 2- Remoção de tanques de combustível	7
Figura 3- Diferentes fases de contaminação	7
Figura 4- Zonas do solo divididas de acordo com o teor de umidade	11
Figura 5- Tipos de poros relacionados com a permeabilidade	12
Figura 6- Características do BTEX	15
Figura 7- Tensões interfaciais entre dois líquidos e a superfície	18
Figura 8- Distribuição da água subterrânea e das fases livre e residual	19
Figura 9- Poço de monitoramento utilizado na delimitação de plumas	22
Figura 10- Desenho esquemático das principais partes do aquário	24
Figura 11- Aquário vazio antes de iniciar o ensaio	25
Figura 12- Tubo interno do poço de monitoramento	25
Figura 13- Aquário sendo testado, antes de se iniciar cada ensaio	26
Figura 14- Preenchimento do aquário com esferas de vidro	27
Figura 15- Visualização da zona saturada, da franja capilar e da zona vadosa, no aquário	28
Figura 16- Franja capilar de água	28
Figura 17- Nível posicionado sobre o aquário	28
Figura 18- Condições pré-contaminação	29
Figura 19- Funis posicionados para a injeção de gasolina	29
Figura 20- Gasolina misturada com corante vermelho	30
Figura 21- Gasolina migrando lateralmente, no início da contaminação	30
Figura 22- Fase livre de gasolina, formada após a contaminação	31
Figura 23- Válvulas para entrada e saída de água do aquário	31
Figura 24- Zona de transição no poço de monitoramento	37
Figura 25- Zona de transição no poço de monitoramento	40
Figura 26- Zona de transição no poço de monitoramento	45
Figura 27- Franja capilar invadida pela gasolina	50
Figura 28- Fase livre no poço de monitoramento e no meio poroso	51
Figura 29- Fase livre no poço de monitoramento	51
Figura 30- Fase livre no poço de monitoramento	52

índice de gráficos e tabelas

Gráficos

Gráfico 1- Dados do primeiro ensaio com E-25	33
Gráfico 2- Comparação entre as espessuras de gasolina no poço de monitoramento e no aquífero	34
Gráfico 3- Relação entre as espessuras de fase livre no poço de monitoramento e no aquífero	34
Gráfico 4- Evolução da espessura da zona de transição em comparação com a fase livre no sistema	35
Gráfico 5- Parâmetros anotados durante o ensaio 2	37
Gráfico 6- Relação entre as espessuras de fase livre no aquífero e no poço de monitoramento	38
Gráfico 7- Relação entre as espessuras de fase livre no aquífero e no poço de monitoramento	39
Gráfico 8- Variação da espessura de gasolina E-25 e de água no meio poroso e no poço de monitoramento	39
Gráfico 9- Variação da fase livre no meio poroso e no poço de monitoramento	40
Gráfico 10- Variação dos níveis de água no poço de monitoramento e no aquífero (ensaio 3)	44
Gráfico 11- Variação da espessura de fase dissolvida visível ao longo do ensaio 3	45
Gráfico 12- Variação da espessura de fase livre (pç) e fase dissolvida visível (pç) (ensaio 3)	46
Gráfico 13- Variação da espessura de fase livre poço e fase livre aquífero	47
Gráfico 14- Variação da fase livre poço e no aquífero e relação da fase livre no poço sobre a fase livre no aquífero	49
Gráfico 15- Variação dos níveis d'água no poço e no aquífero	54
Gráfico 16- Variação das espessuras de fase livre no poço de monitoramento e no aquífero	54
Gráfico 17- Variação da relação da fase livre no poço e fase livre no aquífero (ensaio 4)	56
Gráfico 18- Comparação entre as espessuras de fase livre de gasolina pura e de gasolina com etanol no poço de monitoramento e no aquífero	63

Tabelas

Tabela 1- Porosidades totais e efetivas em sedimentos inconsolidados	13
Tabela 2- Valores de permeabilidade intrínseca e Condutividade hidráulica para sedimentos inconsolidados	14

Tabela 3- Principais características dos combustíveis	15
Tabela 4- Densidade dos combustíveis	16
Tabela 5- Viscosidade da gasolina pura e do etanol	16
Tabela 6- solubilidade dos compostos de BTEX	17
Tabela 7- Material utilizado na construção do aquário	23
Tabela 8- Propriedades físicas e químicas das esferas de vidro	27
Tabela 9- Dados do primeiro ensaio de gasolina com etanol	33
Tabela 10- Parâmetros do segundo ensaio de gasolina com etanol	36
Tabela 11- Relação entre a fase livre no poço e sobre a fase livre no aquífero	38
Tabela 12- Dados dos parâmetros do meio poroso	41
Tabela 13- Dados dos parâmetros do poço de monitoramento	42
Tabela 14- Relação entre a fase livre no poço de monitoramento e no aquífero	47
Tabela 15- Parâmetros observados no ensaio com gasolina pura	53
Tabela 16- Relação entre a fase livre no poço de monitoramento e no aquífero para gasolina pura	55
Tabela 17- Comparação entre os valores das relações de gasolina no poço e no aquífero após 24 horas de ensaio	59

### **Índice de Equações**

Equação 1- Altura de ascensão capilar	11
Equação 2- Porosidade total	12
Equação 3- Porosidade efetiva	12
Equação 4- Condutividade hidráulica	13
Equação 5- Lei de Raoult	17
Equação 6- Lei de Raoult	17
Equação 7- Profundidade de gasolina abaixo do nível d'água	20

## AGRADECIMENTOS

A Deus por estar sempre ao meu lado iluminando meu caminho, guiando meus passos na vida.

À minha família, que me apoiou em todos os momentos da minha vida.

Ao professor Dr. Emílio Velloso Barroso, pela orientação e incentivo nesta pesquisa e em todos os projetos que participei sob a sua orientação e mais do que isso pela grande amizade.

Ao professor Dr. Eurípides do Amaral Vargas Júnior pela orientação nesta e em outras pesquisas desenvolvidas sob sua orientação, e também pela sua amizade e paciência.

Ao técnico Quintão pela ajuda no desenvolvimento e montagem do aquário principal ferramenta utilizada nesta pesquisa.

Ao professor Tácio Mauro Pereira de Campos do Departamento de Engenharia Civil da PUC – Rio, coordenador do projeto PRONEX, pelo auxílio financeiro na montagem do modelo físico.

À Petróleo Brasileiro S.A – Petrobrás por ter cedido quantidade suficiente de gasolina para realização desta pesquisa.

A engenheira e grande amiga Janaína, por ter me ajudado muito no desenvolvimento desta pesquisa, sua contribuição foi fundamental para este trabalho.

A amiga de turma Gilmara Alexandre pela ajuda na filmagem dos ensaios.

Aos amigos Cauê Bielschowsky, Cícero Batista, Fabiana Coelho, Hilton Pereira, Leandro Santos, Marcelo Mendes, Marcos Baião, Max Vasconcelos, Melissa Nogueira, Rodrigo Stutz, Thiago Carvalho e Vivian Pessoa além de todos que estiveram comigo durante todos os momentos na faculdade.

# 1-Introdução

Assuntos relacionados ao meio ambiente vem recebendo cada vez mais atenção da sociedade, assumindo um papel de destaque nas reuniões sobre o futuro dos recursos naturais. O modo de vida da sociedade moderna, com seu crescente avanço tecnológico aumentou consideravelmente a pressão sobre os ecossistemas, resultando em extinção de espécies, contaminação de solos e aquíferos além de outros problemas, causando um desequilíbrio no meio natural.

Os cuidados com os aquíferos, que são a maior reserva de água doce do mundo não tem sido suficientes para que estes sejam conservados e assim possam garantir uma fonte de água saudável. Muitas vezes a falta de entendimento do que seria um aquífero e qual sua importância contribui para o total descuido com a sua poluição.

Aquífero é uma reserva de água, acumulada nas rochas seja pela porosidade granular ou pela porosidade fissural, capaz de armazenar e transmitir quantidades significativas de água. O aquífero pode ser de variados tamanhos. Eles podem ter uma área de poucos km<sup>2</sup> a milhares de km<sup>2</sup>, e também, podem apresentar espessuras de poucos metros a centenas de metros. Quando a unidade aquífera é formada por mais de uma formação geológica, com características hidrogeológicas semelhantes, podemos chamá-la de sistema aquífero (Feitosa, 2000).

Os acidentes ocorridos com petróleo e seus derivados têm recebido atenção especial devido ao grande número de casos envolvidos, principalmente no período de armazenagem. As estatísticas oficiais da Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2002) apontam que existia no Brasil, no final de 2001, 32.697 postos revendedores de combustível e 322 bases distribuidoras de combustível. A grande quantidade de postos revendedores de gasolina é um grande risco tanto para o meio ambiente, bem como a população circunvizinha, pois o risco de ocorrerem acidentes, como derrames de combustível durante a transferência de abastecimento para os tanques subterrâneos dos postos de gasolina, e vazamentos de combustível devido à corrosão interna e/ou externa nos tanques subterrâneos é muito alto, além de falhas nas partes soldadas ou até mesmo devido aos erros operacionais de manutenção e de montagem.

A contaminação de solos e águas subterrâneas por compostos orgânicos voláteis tem sido destaque nas últimas décadas, devido à alta frequência com que eles ocorrem, e também devido à gravidade como o meio ambiente é afetado. Embora o que chame a atenção da mídia e da população sejam os grandes acidentes de petróleo, um tipo de poluição que se estima ser muito maior e mais perigosa, são os lentos e contínuos vazamentos de combustível dos postos de distribuição.

Problemas com tanques velhos que já passaram da idade adequada, e vazamentos em bombas e linhas de combustível são as principais causas dos vazamentos, embora os chamados derrames operacionais, que ocorrem durante o manuseamento dos combustíveis, sejam tão preocupantes quanto os outros, porque não se tem controle sobre a quantidade de vezes que eles ocorrem e nem do volume envolvido.

Atualmente, existem cerca de 2.586 postos no Rio de Janeiro (ANP, 2004) respondendo com 150.000 m<sup>3</sup> (10% do total movimentado no país). Estima-se que o número de frentistas que trabalham no Rio de Janeiro esteja na ordem de 10.000 a 12.000. O grande número de postos aliado às más condições de armazenamento de combustíveis, devido a tanques em idade avançada, constitui uma das principais fontes de contaminação,

não apenas pelo volume envolvido, mas pelo caráter sistêmico que representam e pelos efeitos nocivos sobre a qualidade dos aquíferos (figuras 1, 2 e 3).

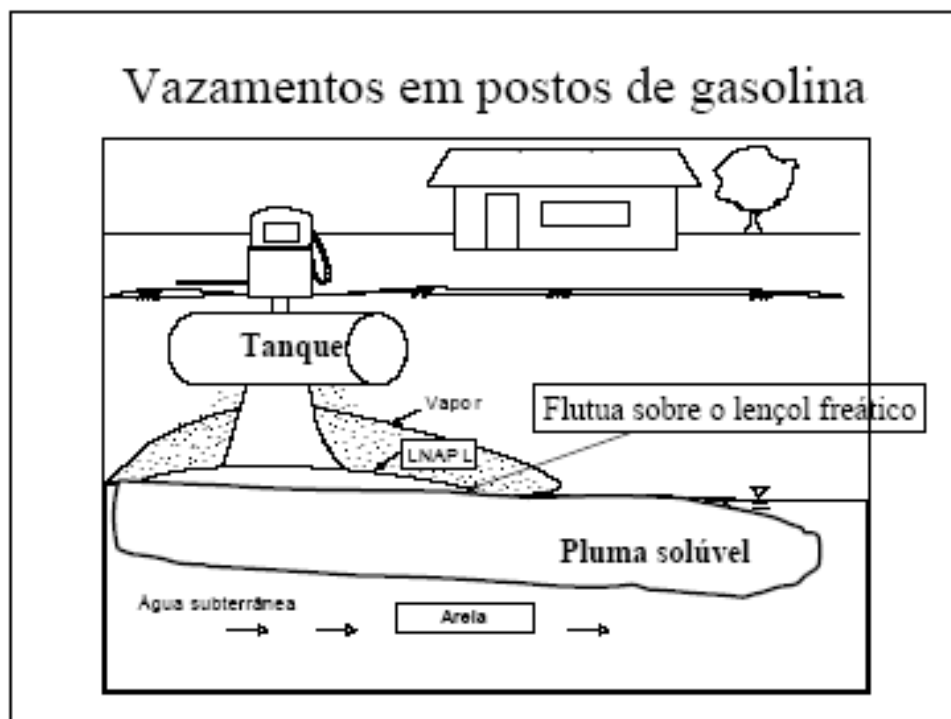
A compreensão da dinâmica dessas contaminações é fundamental para orientar as atividades de investigação e diagnóstico dos impactos gerados pelos vazamentos de combustíveis chamados de *LNAPL-Light-Non-Aqueous-Phase-Liquids*, bem como para desenvolver técnicas de remediação econômicas e ambientalmente viáveis.

É muito comum, na prática de estudos ambientais, a utilização de poços de monitoramento para se medir, em seu interior, a espessura de fase livre de gasolina que fica sobre o nível d'água, ou de qualquer outro fluido menos denso que a água. Esta medida é relevante para se avaliar a distribuição e se estimar a quantidade do contaminante investigado.

Nestes casos, a espessura do contaminante é medida com o auxílio de sensores especiais, sensíveis à interface óleo-água. Entretanto, esta medida, realizada no poço de monitoramento não reflete diretamente a espessura do produto no aquífero, pois algumas características do solo como granulometria, permeabilidade, porosidade e também características do próprio fluido envolvido podem fornecer idéias erradas sobre a verdadeira quantidade de produto envolvido numa contaminação no subsolo e no aquífero.



**Figuras 1 & 2:** Remoção de tanques de combustível em péssimo estado de conservação. A idade avançada de muitos tanques no Brasil é uma das principais causas de vazamentos, (Fonte [www.tecnohidro.com.br](http://www.tecnohidro.com.br)).



**Figura 3:** Desenho esquemático mostrando pluma de contaminação, passando pelas diversas zonas do solo até atingir o lençol d'água.



## 2- Objetivos

Os vazamentos em postos de abastecimento de combustíveis constituem as fontes mais expressivas, não pelo volume individual da contaminação, mas pelo caráter sistêmico que representam e pela repercussão que geram sobre a qualidade dos aquíferos. Entender a dinâmica dessas contaminações (referidas como LNAPL - light non-aqueous phase liquids) é fundamental para orientar as atividades de diagnóstico e remediação dos impactos gerados pelos vazamentos de combustíveis, que sejam econômica e ambientalmente viável.

O desenvolvimento de modelos físicos que reproduzem, em escala reduzida, situações reais é uma prática cada vez mais comum em universidades e empresas que investem em pesquisa científica. O uso dos modelos permite construir e controlar situações naturais antes praticamente impossíveis de analisar devido ao seu tamanho e/ou custo muito elevado, permitindo que pesquisadores analisem com mais detalhes fenômenos naturais, como é o caso do túnel de vento usado para pesquisa de aerodinâmica em veículos, tanque moderno com simuladores de ondas, muito utilizado pela indústria naval e petrolífera, além de outros diversos exemplos.

Projitou-se um modelo simples que foi confeccionado no Laboratório de Preparação de Amostras do Departamento de Geologia da UFRJ. As características do modelo permitem que o pesquisador acompanhe todas as fases de evolução da contaminação. Dessa maneira os dados podem não apenas ser coletados como também observados.

Este trabalho apresenta uma visão conceitual e prática do comportamento da gasolina comercial brasileira (22% de etanol) em um subsolo arenoso (simulado por esferas de vidro). A adição de etanol à gasolina faz com que o comportamento da mistura seja bastante diferente do comportamento da gasolina pura. No que diz respeito à degradação, o etanol pode ser degradado em preferência aos BTEX e consumir todo o oxigênio para a degradação dos hidrocarbonetos monoaromáticos (Fernandes, 1997).

Por ser miscível com a água, em casos de derramamento de gasolina com etanol, o álcool existirá em elevadas concentrações na água subterrânea. O álcool age como co-solvente aumentando a solubilidade dos compostos da gasolina na fase aquosa, sugerindo um cenário de contaminação envolvendo a gasolina e etanos diferentes daquele envolvendo a gasolina pura, além de diminuir a tensão interfacial entre a gasolina e a fase aquosa, aumentando a mobilidade da gasolina como fase livre.

O objetivo central deste trabalho será avaliar o comportamento dos dois diferentes tipos de gasolina (pura e misturada com etanol) em relação às espessuras da fase livre do contaminante no aquífero e no poço de monitoramento, pela redução da tensão interfacial entre a gasolina e a água e entre a água e o ar, devido à presença de co-solventes como o etanol.

A observação desse comportamento fornecerá dados, que serão analisados e comparados com outros experimentos semelhantes realizados, podendo assim ajudar a compreender melhor os processos que governam o comportamento da gasolina no solo, o que é muito importante para se determinar o tamanho da pluma de contaminante e o tipo de sistema de remediação a ser instalado.

### 3- Interação entre solo, água e hidrocarbonetos

Quando ocorre um derramamento de produtos derivados de hidrocarbonetos em água são formadas diferentes fases da mistura (água + contaminante) dependendo do tipo de derivado considerado.

A gasolina utilizada no Brasil recebe a adição de compostos oxigenados como o etanol em aproximadamente 25% em volume e no mínimo 20% de acordo com a lei 10.464 de 24/05/2002 PAR. 1º DO ART. 9º. O objetivo dessa mistura é aumentar a octanagem do motor e diminuir a emissão de monóxido de carbono na atmosfera.

A solubilidade efetiva em água de um composto orgânico particular presente na gasolina ou em uma mistura de líquidos de fase não aquosa (NAPL) pode ser estimada conhecendo-se a solubilidade do composto puro e sua fração na gasolina. O fato mais preocupante é que a solubilidade da gasolina aumenta bastante se forem misturados a ela compostos oxigenados tais como álcoois e éteres.

Quando ocorre um derramamento de gasolina em solo saturado (aquéifero) a presença dos álcoois adicionados na gasolina (25% de etanol) contribui para o agravamento da contaminação, porque a presença de álcoois na água pode facilitar a transferência dos BTEXs presentes na gasolina para a fase aquosa, aumentando a solubilidade dos hidrocarbonetos monoaromáticos na água subterrânea, processo este denominado efeito co-solvência (FERNANDES e CORSEUIL, 1996).

Uma compreensão dos conceitos do comportamento dos combustíveis no solo é necessária para que se possa avaliar e confirmar a presença de contaminantes derivados de hidrocarbonetos, além de ser imprescindível para escolha do melhor sistema de tratamento dos solos e aquíferos.

Na geologia, o solo pode ser caracterizado como o produto de intemperismo das rochas. Na pedologia, ele é caracterizado como o material natural constituído de camadas ou horizontes de compostos minerais e/ou orgânicos com variadas espessuras, que é a melhor definição para o estudo em questão. Os horizontes do solo são na maioria das vezes inconsolidados, porém concentrações de sílica, carbonatos ou óxidos de ferro podem ajudar a consolida-los.

O solo pode ser dividido em zonas que se diferenciam também pela presença de água e ar, ou seja, pelo teor de umidade encontrado. Basicamente existem apenas duas zonas, a zona saturada onde a umidade é de 100% e onde encontramos a água subterrânea, e a zona não saturada umidade abaixo de 100% (poros preenchidos por ar).

### 3.1- Zonas do Solo

#### **Zona Não-Saturada**

Localiza-se logo abaixo da superfície, e é chamada de zona de aeração, definida dessa maneira porque parte dos seus espaços intergranulares está preenchida por ar e a outra por vapor d'água, além de uma quantidade pequena de água. Também conhecida como zona vadosa, ela se estende desde a superfície até o topo da franja capilar.

Na zona não saturada do solo ocorre o trânsito da água que se infiltra na superfície e por ação da gravidade se direciona para os aquíferos ou porções bem inferiores do solo. A sua espessura pode variar de menos de 1 metro nas regiões alagadiças até 100 metros nas regiões áridas. Nesta zona a água ocorre na forma de películas aderidas aos grãos do solo. Solos muito finos tendem a ter mais umidade do que os mais grosseiros, pois há mais superfícies de grãos onde a água pode ficar retida por adesão.

**A zona não saturada pode ser dividida ainda em duas sub-zonas.**

**Zona de umidade do solo:** é a parte mais superficial, onde a perda de água de adesão para a atmosfera é intensa. Em alguns casos é muito grande a quantidade de sais que se precipitam na superfície do solo após a evaporação desta água, dando origem a solos salinizados ou a crostas ferruginosas (lateríticas).

#### **Zona intermediária:**

Região compreendida entre as duas anteriores e com umidade menor do que na franja capilar e maior do que na zona superficial do solo. Em áreas onde o nível freático está próximo da superfície, a zona intermediária pode não existir, pois a franja capilar atinge a superfície do solo. São brejos e alagadiços, onde há uma intensa evaporação da água subterrânea.

#### **Zona Saturada**

Estendendo-se do topo da franja capilar até o fundo lençol freático, ocorre a zona saturada, nela todos os espaços intergranulares estão preenchidos por água, que é chamada de água subterrânea (termo empregado para qualquer água encontrada na zona saturada).

A franja capilar é a porção superior da zona saturada, nela a água subterrânea se encontra acima da superfície do lençol freático. A água encontrada nessa porção é chamada de água capilar e é levada até essa posição por movimentos contrários ao da ação da gravidade, provocados por forças capilares, resultantes de tensões superficiais atuantes na interface água-sólido e na interface ar-água no interior dos capilares e de atrações moleculares. A altura de uma franja capilar depende do diâmetro dos poros, da tensão superficial, do ângulo de contato do menisco no capilar e da presença de impurezas na água.

Pode-se determinar a altura capilar empiricamente pela equação (Attewell e Farmer, 1979):

$$H_c = C/e_v \cdot D_{10} \text{ (Eq - 1)}$$

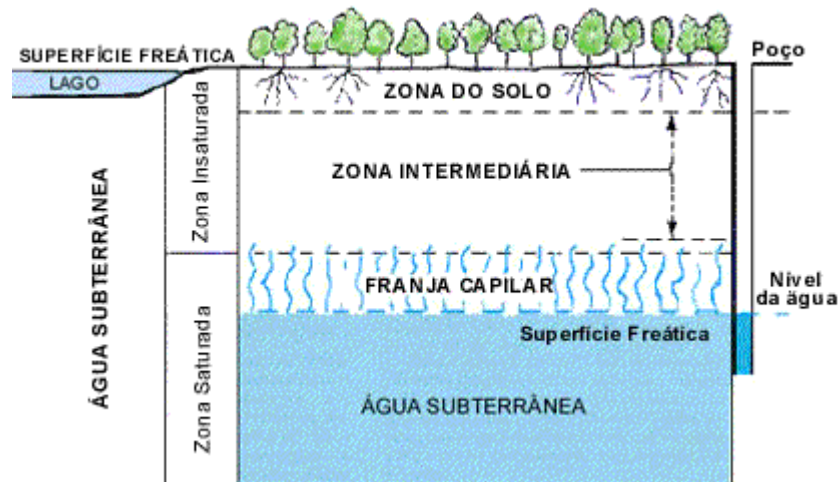
Sendo:

$H_c$  = altura de ascensão capilar

$C$  = constante empírica, que depende do tamanho das partículas e das impurezas presentes na água (em  $\text{cm}^2$ , varia de 0,1 a 0,5).

$e_v$  = índice de vazios

$D_{10}$  = diâmetro efetivo do solo

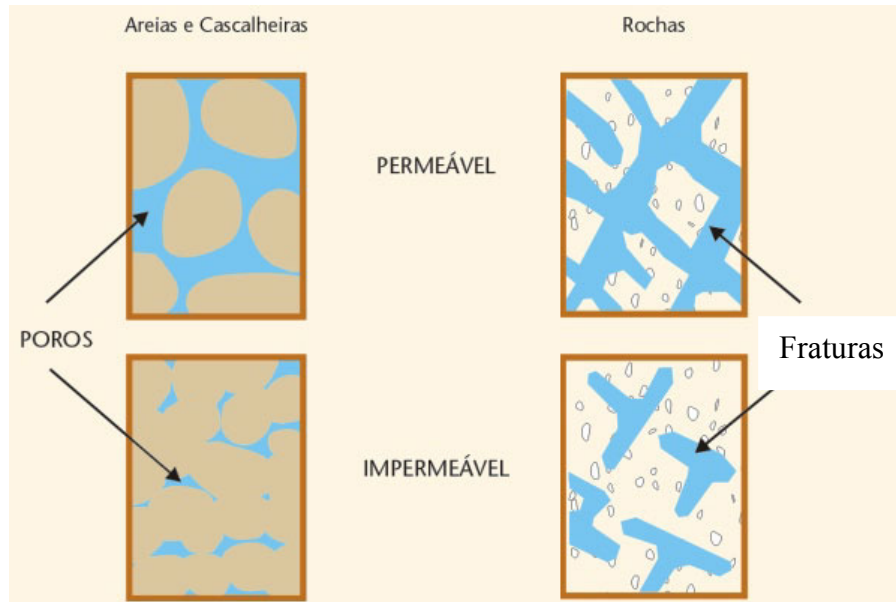


**Figura 4:** Zonas do solo divididas de acordo com o teor de umidade e presença de água, (*Fonte* <http://educar.sc.usp.br/ciencias/recursos/agua.html>).

As propriedades físicas dos solos que mais influenciam o comportamento dos fluidos são a porosidade e a condutividade hidráulica, propriedades estas que estão interligadas de modo que a condutividade hidráulica depende da porosidade e das conexões entre os poros.

A porosidade é a proporção entre o volume de vazios e o volume total (poros + grãos). A porosidade primária é formada durante a deposição dos sedimentos e também pode ser chamada de sindeposicional, e a porosidade secundária é formada após a deposição dos sedimentos e pode ter inúmeras causas.

As redes de poros podem estar totalmente interconectadas, e assim a circulação da água ocorre livremente, embora nem sempre esta seja a realidade na natureza, onde podem ocorrer poros totalmente isolados impedindo a água de circular ou redes com poucas conexões que tornam o movimento da água muito lento.



**Figura 5:** Tipos de poros relacionados a permeabilidade Fonte: [http://www.igm.pt/edicoes\\_online/diversos/agua\\_subterranea/indice.htm](http://www.igm.pt/edicoes_online/diversos/agua_subterranea/indice.htm).

Numericamente a porosidade total ( $\eta$ ) é definida como sendo a relação entre o volume de vazios ( $V_v$ ) e o volume total considerado ( $V$ ).


$$\eta = V_v/V \text{ (Eq - 2)}$$

Para estudos relacionados a fluxos subterrâneos, deve-se levar em consideração a porosidade efetiva, ou seja, aquela que reflete o grau de intercomunicação entre os poros, influenciando diretamente na velocidade do fluxo subterrâneo. A porosidade efetiva ( $\eta_e$ ) representa apenas uma pequena parcela da porosidade total e é expressa pela relação entre o volume ocupado pela água livre ( $V_e$ ) e o volume total ( $V$ ).

$$\eta_e = V_e/V \text{ (Eq - 3)}$$

O solo simulado no modelo físico desenvolvido representa um meio arenoso (sílica) de esfericidade mínima de 80% e grãos com diâmetros entre 0,85 e 0,60 mm. Muito provavelmente a porosidade é granular, permitindo a livre circulação da água, assim, podem ser aplicadas as leis que regem o fluxo nos meios porosos como, a Lei de Darcy.

**Tabela 1:** Tabela de porosidades totais e efetivas em sedimentos inconsolidados (Oliveira, 2002).

Material	Porosidade Total ( $\eta$ )			Porosidade Efetiva ( $\eta_e$ )			Obs
	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	
Aluviões  Argilas sem compactação e solos sup.	25	40	20	15	35	5	*
	35	40	30	20	30	10	-
	30	40	25	25	35	15	-
	45	55	40	<5	10	0,1	*
	35	45	20	25	35	10	-
	25	35	15	15	30	5	-
	40	50	35	10	20	2	*
	50	60	30	10	20	1	*

Obs: \*  $\eta$  e  $\eta_e$  e muito variáveis conforme circunstância e tempo.

A permeabilidade é um dos principais parâmetros, exprimindo maior ou menor facilidade de percolação da água. A figura 5 apresenta as variações de permeabilidade (condutividade hidráulica do solo), considerando que a água é o líquido intergranular, ou intersticial primário, não sendo aplicada para solos onde os líquidos intersticiais são hidrocarbonetos líquidos.

A quantidade de água que está presente no solo assim como as características e concentrações dos constituintes dos hidrocarbonetos podem influenciar significativamente o comportamento dos combustíveis líquidos no solo.

O conhecimento da condutividade hidráulica do solo é essencial para qualquer modelagem que envolva o movimento da água no solo. De acordo com a Lei de Darcy, o coeficiente de permeabilidade é um valor constante para cada meio e para cada fluido, dentro de condições determinadas. Além de variar com a umidade, a condutividade hidráulica do solo ( $K$ ) apresenta alta variabilidade espacial, tanto em determinações no campo como no laboratório (Feitosa, 2000).

A condutividade hidráulica depende das características do meio poroso e das propriedades do fluido, desse modo um fluido mais viscoso terá uma velocidade menor no meio poroso do que um fluido menos viscoso. A condutividade hidráulica pode ser expressa em função dos parâmetros do meio e do fluido da seguinte forma:

$$K = k\rho g/\mu = kg/v \text{ (Eq - 4)}$$

Onde:

$K$  = condutividade Hidráulica [L/T]

$k$  = permeabilidade intrínseca do meio poroso [ $L^2$ ]

$\rho$  e  $\mu$  = representam as características do fluido, respectivamente massa específica e viscosidade absoluta. Também pode ser utilizada a viscosidade cinemática.  $v = \mu / \rho$  [ $L^2/T$ ]

$g$  = aceleração da gravidade

A permeabilidade intrínseca ( $k$ ), é função do material poroso, sua granulometria e sua disposição estrutural e é normalmente expressa em  $\text{cm}^2$  ou em Darcy ( $1 \text{ Darcy} = 0,97 \times 10^{-8} \text{ cm}^2$ ).

Quanto maior o tamanho médio dos grãos do solo, maior a permeabilidade (porque os vazios são maiores). Pode-se dizer também que, quanto maior o desvio padrão do diâmetro das partículas, menor a permeabilidade (o aumento do desvio padrão indica maior variação no tamanho dos grãos, o que significa dizer que grãos menores ocupam espaços vazios deixados pelos grãos maiores) (tabela 2).

**Tabela2:** Valores de Permeabilidade intrínseca e Condutividade Hidráulica para vários materiais não consolidados (Fetter, 1999).

Material	Permeabilidade intrínseca ( $\text{cm}^2$ )	Condutividade Hidráulica ( $\text{cm/s}$ )
Argila	$10^{-14} - 10^{-11}$	$10^{-9} - 10^{-6}$
Silte; Silte arenoso	$10^{-11} - 10^{-9}$	$10^{-6} - 10^{-4}$
Areia argilosa	$10^{-11} - 10^{-9}$	$10^{-6} - 10^{-4}$
Areia siltosa; Areia fina	$10^{-10} - 10^{-8}$	$10^{-5} - 10^{-3}$
Areia bem distribuída	$10^{-8} - 10^{-6}$	$10^{-3} - 10^{-1}$
Cascalho bem distribuído	$10^{-7} - 10^{-5}$	$10^{-2} - 10^0$

### 3.2 Características da Gasolina

O petróleo é basicamente constituído por átomos de carbono e hidrogênio, além de menores quantidades de enxofre, nitrogênio e oxigênio em diferentes proporções. A composição do petróleo também varia de acordo com as rochas das quais ele foi extraído. Dessa maneira de acordo com a quantidade de átomos de carbono, classifica-se o petróleo em pesado e viscoso ou leve e volátil, assim, cada tipo de petróleo será favorável para produção de um diferente tipo de combustível, além de outros usos, utilizando diferentes tipos de refinamento.

Os derivados de petróleo são formados por uma complexa mistura de compostos orgânicos. Na sua composição final, são adicionados aditivos e agentes de mistura para melhorar o desempenho e a estabilidade do combustível. Além desses aditivos a gasolina comercializada no Brasil possui uma adição de aproximadamente 25% de etanol.

A gasolina é composta por numerosos constituintes relativamente voláteis, e a maior parte desses pode ser classificada em dois grupos, os alifáticos e os aromáticos, variando de quatro a doze átomos de carbonos.

Os compostos alifáticos incluem constituintes como butano, penteno e o octano. No grupo dos aromáticos estão o benzeno, tolueno, etilbenzeno e os xilenos (BTEX). Os compostos presentes no grupo dos aromáticos são indicadores úteis da quantidade de hidrocarbonetos resultante de vazamentos relativamente recentes e representam também os compostos voláteis e solúveis encontrados na gasolina e óleo diesel.

Os destilados médios, tais como diesel e querosene, podem conter até 500 constituintes individuais, dos quais grande parte tende a ser menos volátil e menos solúvel que os de misturas de gasolina. Os destilados médios também tendem a ter concentrações menores de aromáticos como BTEX (menos de 1,5% por peso). Vazamentos antigos desses

destilados médios podem não apresentar níveis apreciáveis e detectáveis de compostos aromáticos porque esses compostos podem se volatilizar depois de um certo período. Esse fato deve ser levado em conta quando os compostos aromáticos são usados como indicadores da presença de hidrocarbonetos em combustíveis expostos a intempéries, o que inclui também a gasolina.

Aditivos e oxigenados estão presentes nas gasolinas e nos destilados médios. Aditivos consistem de antioxidantes, inibidores de metal e detergentes, que podem formar até 0,5 por cento em volume da gasolina e do diesel. Os oxigenados encontrados na gasolina consistem de intensificadores de octano, tais como álcoois (etanol) e éteres, e podem atingir 10% em volume ou até mais. No caso da gasolina brasileira existe uma lei federal que exige que a gasolina tenha uma adição de 25% de álcool anidro (fonte: [www.br.com.br](http://www.br.com.br)). Os oxigenados e os aromáticos são os constituintes mais solúveis da gasolina em água, a gasolina residual presa no solo pode liberar esses componentes solúveis para se dissolver na água que se infiltra através da zona não saturada; conseqüentemente, esses componentes podem migrar e afetar a água subterrânea com maior velocidade.

**Tabela 3:** principais características dos combustíveis ([www.br.com.br](http://www.br.com.br)).

Composição da gasolina	
Composto	Concentração
n-parafinas	15%
Iso-parafinas	30%
Cicloparafinas	12%
Aromáticos	35%
Tolueno	8,3 a 16,8% (em massa)
Benzeno	1,1% (em volume)
Xilenos	10,3 a 20,8% (em massa)
Oleofinas	8%

Dentre os constituintes da gasolina o benzeno ( $C_6H_6$ ) é considerado um dos que mais oferece riscos à saúde humana. O benzeno é um hidrocarboneto, estável, de odor agradável, bastante tóxico, podendo lesar células sanguíneas e causar câncer. É utilizado como matéria prima na obtenção de vários produtos (tintas, ceras, lubrificantes, etc.), intermediários químicos e também é encontrado na gasolina automotiva.



**Figura 6:** Características do BTEX. Fonte: Adaptado do Projeto Petrobrás (REMAS-UFSC)



### 3.2.1: Principais propriedades físicas dos fluidos:

- **Densidade**
- **Viscosidade dinâmica**
- **Pressão de vapor**
- **Solubilidade**
- **Molhabilidade**

#### Densidade

A densidade de um fluido é definida como a massa por unidade de volume, e é uma das propriedades mais importantes para se determinar o comportamento da gasolina no solo. O valor da densidade da gasolina é sempre inferior ao da densidade da água, que é de 0,998 g/mL a 15<sup>0</sup> C. Dessa maneira, a gasolina flutua sobre a água no caso de um vazamento em água. Devido a essa importante propriedade, a gasolina é classificada como um LNAPL (*light non - aqueous phase liquids*), ou seja, fase líquida imiscível leve ou menos densa que a água. Sabe-se também que a densidade de um fluido depende da temperatura e também da sua composição (tabela4).

**Tabela 4:** densidade dos combustíveis; Fonte (Ferreira, 2003)

<b>Densidade dos combustíveis</b>		
<b>Combustível</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Densidade</b>
Gasolina pura	25 <sup>0</sup> C	0,7347 g/mL
Gasolina com etanol	25 <sup>0</sup> C	0,7475 g/mL
Etanol puro.	21 <sup>0</sup> C	0,7845 g/mL

#### Viscosidade dinâmica

A viscosidade dinâmica é a medida da resistência de um fluido para escoar. A viscosidade também se relaciona com a temperatura, de modo que à medida que a temperatura aumenta tende a baixar a viscosidade, causando uma maior mobilidade da gasolina no solo. A mistura de álcool e gasolina (aproximadamente 25% no caso brasileiro) torna os casos de contaminação ainda mais graves, uma vez que essa mistura diminui a viscosidade da gasolina, aumentando sua mobilidade. A viscosidade da água é de 1,14 centipoise. Na tabela abaixo se tem a viscosidade de alguns combustíveis.

**Tabela 5:** Viscosidade da gasolina pura e do etanol ; Fonte (Ferreira, 2003)

<b>Viscosidade dos combustíveis</b>		
<b>Combustível</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Viscosidade</b>
Gasolina pura	15 <sup>0</sup> C	0,62 cp
Etanol	20 <sup>0</sup> C	1,20 cp

## Pressão de vapor

A pressão de vapor pode ser usada para indicar a tendência de um constituinte líquido de se volatilizar e passar para a fase de vapor. A proporção de volatilização da gasolina líquida depende da pressão de vapor de seus constituintes: quanto maior a pressão de vapor, maior a volatilização. A pressão total de vapor da gasolina pode ser dada pela soma das pressões parciais dos constituintes individuais.

A pressão de vapor de um determinado composto é menor em misturas do que no composto puro, e pode ser representado pela Lei de Raoult:

$$P_i^{ef} = X_i \cdot P_i \text{ (Eq - 5)}$$

### Onde:

$P_i^{ef}$  = Pressão de vapor efetiva (atm)

$X_i$  = Composição do composto  $i$  na mistura

$P_i$  = Pressão de vapor do composto puro  $i$  na temperatura  $t$  (atm)

## Solubilidade

A solubilidade dos constituintes da gasolina é a medida de quanto um determinado constituinte pode se dissolver em água. Os constituintes de hidrocarbonetos que apresentam maior solubilidade são os aromáticos leves, como o benzeno, tolueno, etilbenzeno e o xileno. Oxigenados da gasolina, como o etanol e o metanol, apresentam solubilidade quase duas vezes maior que a solubilidade dos aromáticos leves, tornando-se um agravante em derrames de gasolina brasileira (mistura de 20-25% de etanol) em aquíferos ou outros corpos d'água, uma vez que a presença do etanol aumenta consideravelmente a solubilidade dos aromáticos leves e, conseqüentemente, sua dispersão em corpos d'água (Zamora, 2004).

**Tabela 6:** Solubilidade dos compostos de BTEX; Fonte: (Ferreira, 2003).

Solubilidade dos Compostos BTEX a 25 <sup>o</sup> C			
Composto	Fórmula	Peso Molecular (g/mol)	Solubilidade (mg/L)
Benzeno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78	1780
Tolueno	C <sub>9</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	92	515
Etilbenzeno	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> .C <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	106	150
o- xileno	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	106	175

### Lei de Raoult

$$S_i^{ef} = X_i \cdot S_i \text{ (Eq - 6)}$$

### Onde:

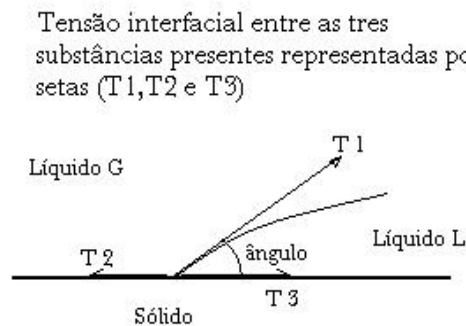
$S_i^{ef}$  = solubilidade do composto  $i$  na mistura (mg/L)

$X_i$  = Fração molar do composto  $i$  na mistura

$S_i$  = Solubilidade do composto puro  $i$  na temperatura  $t$  (mg/L)

## Molhabilidade

O ângulo de molhabilidade (também conhecido como ângulo de contato) entre uma gota de um líquido e outro líquido ou gás com uma tensão superficial conhecida ou ainda uma superfície sólida depende da relação entre as forças adesivas, que fariam a gota se espalhar sobre a superfície, e as forças coesivas do líquido, que querem contrair a gota a uma esfera com uma superfície mínima. Se a gota repousa sobre uma superfície homogênea perfeitamente nivelada, se forma um ângulo de contato de equilíbrio entre o líquido e a superfície sólida (Figura 7).

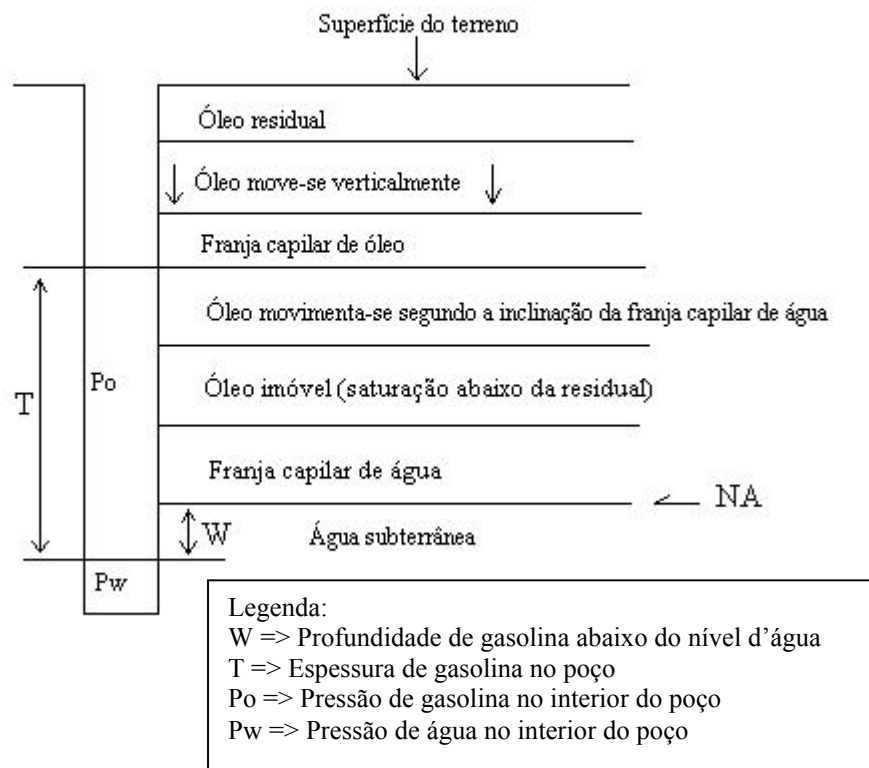


**Figura 7:** Tensões interfaciais entre os dois líquidos e a superfície, representados por setas (T 1, T2 e T3), e o ângulo de molhabilidade, (adaptado de Fetter, 1997).

Na figura 7 tem-se três substâncias em contato, o líquido G, o líquido L e o sólido. Por convenção, o ângulo  $\theta$  é medido através do líquido mais denso. Em geral, um ou outro líquido irá preferencialmente se espalhar, ou molhar a superfície sólida. Se  $\theta$  for menor que  $90^\circ$  então o líquido L vai preferencialmente molhar a superfície, porém se  $\theta$  for maior que  $90^\circ$  então o líquido G vai molhar a superfície.

### 3.3- Fases da Contaminação

Na ocorrência de um vazamento de um LNAPL na superfície do solo, eles migram verticalmente através da zona não saturada sob a influência da gravidade e das forças capilares, o LNAPL é o fluido não molhante e a água é o fluido molhante. Em um aquífero, podem se formar diferentes fases de contaminação, que vão depender de muitos fatores como a porosidade do solo, permeabilidade, quantidade de contaminante, períodos de chuva entre outros (**figura 8**).



**Figura 8:** Distribuição da água subterrânea e das fases livre e residual de um LNAPL no perfil de solo (modificado de Fetter, 1992).

A profundidade ( $W$ ) da gasolina abaixo do nível d'água pode ser calculada na condição de equilíbrio, onde a pressão de gasolina ( $P_o$ ) igual a pressão de água ( $P_w$ ) no interior do poço.

$P_o = \rho_o gT$ , onde  $\rho_o$  é a massa específica da gasolina,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $T$  é a espessura de gasolina no poço.

$P_w = \rho_w gW$ ; onde  $\rho_w$  é a massa específica da água e  $W$  é a distância entre o nível d'água, no aquífero, e a interface gasolina-água no poço.

$$\rho_w gW = \rho_o gT \Rightarrow W = \frac{\rho_o}{\rho_w} T \text{ (Eq- 7)}$$

### **Fase Livre**

A fase livre é constituída pela parte da gasolina que se dispõe acima do topo do lençol freático, sua espessura depende da quantidade de material derramado, das características texturais do solo e também da dinâmica do aquífero. A presença da fase livre pode causar uma depressão no nível d'água. A fase livre não é composta apenas por gasolina, a água e o ar podem ocupar até 50% dos poros. Porém o percentual de hidrocarbonetos no solo não é constante, ele varia das bordas para o interior da fase livre, não existindo assim um limite definido entre as fases, mas sim um espaço de transição entre elas.

### **Fase Residual**

Já a fase residual, constitui o halo de dispersão entre a fonte e o nível freático e caracteriza-se por uma fina película de hidrocarbonetos envolvendo grumos de solo ou descontinuidades existentes no saprólito ou rocha, sendo mais importante para os produtos mais viscosos como o diesel.

Devido às variações freáticas inerentes, a fase residual ocupa uma espessura sobre o topo da fase livre, e também pode haver presença de fase residual na região de oscilação do nível d'água (Fetter, 1992). Essa espessura pode ser mais ou menos significativa, dependendo da viscosidade do produto, da porosidade do solo e das oscilações do freático livre. No caso do estudo realizado no aquário, essas oscilações não existem, uma vez que o aquário é um meio onde a entrada e saída de componentes é controlada.

Quando a gasolina é o líquido molhante dois mecanismos distintos podem formar a fase residual, a adsorção que está relacionada com as atrações eletroquímicas entre os íons que formam o sedimento ou rocha, e o material contaminante, e a tensão interfacial, que é a atração entre a moléculas do líquido e do material do solo.

No caso da água ser o fluido molhante, os grãos já estão cobertos por um filme de fase molhante (água) e assim o contaminante LNAPL forma apenas gânglios no interior dos poros (Fetter, 1992).

### **Fase Dissolvida**

A fase dissolvida é formada pelo produto dissolvido na água subterrânea e é considerada uma das mais importantes para fluidos menos viscosos como a gasolina. No caso da gasolina, que tem uma variedade de compostos orgânicos com diferentes solubilidades, os compostos mais solúveis irão se dissolver mais rapidamente e deixar para trás os menos solúveis. Este processo afeta a concentração do composto na fase aquosa, que diminuirá proporcionalmente com a diminuição da sua fração molar na mistura. A solubilidade dos componentes que formam a gasolina é fortemente afetada pela composição da mistura e tende a ser menor que a solubilidade do componente puro, conforme visto pela Lei de Raoult (Ferreira, 2003).

### **Fase Vaporizada**

A fase vaporizada constitui uma fase gasosa dos componentes voláteis dos combustíveis e que ocupa vazios do solo ou rocha, sendo mais importante para os hidrocarbonetos de menor ponto de vaporização, como aqueles que compõem a gasolina. A fase gasosa dos hidrocarbonetos está presente em meio às demais fases, mas é mais significativa na região vadosa do subsolo.

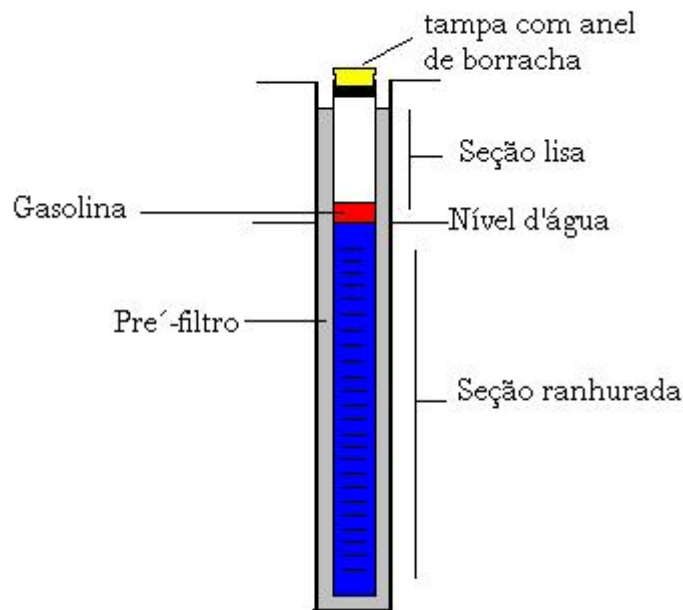
### **Fase Condensada**

Uma das fases que aparece mais tipicamente em área urbana onde a pavimentação do solo é intensa e pouco permeável, é a fase condensada, caracterizando-se pela acumulação de produtos condensados sob os pavimentos. Na verdade é semelhante à fase adsorvida, porém com composição diferente do produto original em virtude do fracionamento seletivo da vaporização. É também uma fase com intensa bioconversão, manifestando-se degradada.

Na maioria dos casos de contaminação por combustíveis em postos de abastecimento, a preocupação do diagnóstico tem se pautado pela delimitação das fases adsorvida e livre, onde as ações de remediação podem ser mais efetivas.

As fases da contaminação são monitoradas com a construção de poços de monitoramento que delimitam as plumas de contaminantes e também são utilizados para retirada de produtos em fase livre e dissolvida, quando são instalados sistemas de remediação para tratamento do aquífero.

O poço é constituído de uma cavidade feita geralmente com trado manual, nela são colocados revestimentos de um tubo de pvc que pode ter diversos diâmetros dependendo do volume que será bombeado ou da profundidade do poço. São instalados em alguns casos pré-filtros e, na maioria dos casos, é instalada também uma proteção sanitária, feita de cimento. O poço é então tampado com uma tampa que possui um anel de borracha resistente e que assim evita que fluidos externos entrem no poço e assim confundam os técnicos quanto à procedência do contaminante (**figura 9**).



**Figura 9:** Poço de monitoramento utilizado na delimitação de plumas de contaminação.

## 4- Metodologia e Material de Estudo

Os estudos em laboratório que simulam situações reais a partir de modelos reduzidos, precisam ser projetados e analisados cuidadosamente, com isso os resultados podem chegar o mais próximo possível da realidade.

Para que o estudo de contaminação de um solo por gasolina possa ser simulado em laboratório é necessário desenvolver recipientes resistentes ao contaminante, e que permitam a melhor visualização do desenvolvimento dos processos.

Desenvolvido no Laboratório de Preparação de amostras do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, o objeto utilizado para a simulação proposta foi um “aquário”, que sendo confeccionado com placas de vidro em suas paredes, permitiu que todo o processo de contaminação pudesse ser acompanhado detalhadamente.

O “aquário” foi projetado de maneira a resistir aos constantes manuseios para preenchimento e limpeza do mesmo, através de reforços em sua estrutura. Também pensando em sua resistência todos os materiais utilizados na construção do aquário foram testados com gasolina para se ter certeza de que eles não reagiriam durante os ensaios, uma vez que não pode ocorrer nenhuma espécie de interação entre a gasolina e o material utilizado (**tabela 7**).

Material Utilizado:

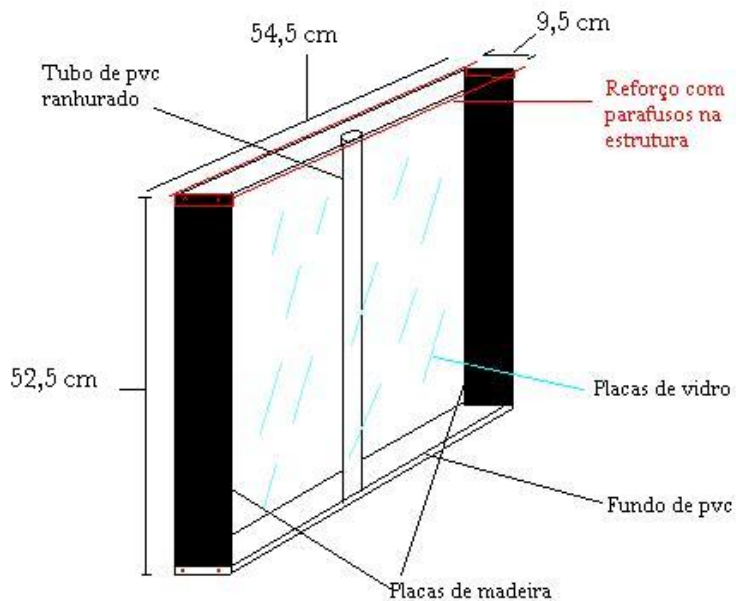
**Tabela 7:** Material utilizado na construção do aquário

Material	Quantidade	Teste	Reação	Observação
Placas de vidro	5	Testado com diferentes tipos de colas, para que fosse escolhido a que apresentasse o melhor resultado de união das placas.	A cola que apresentou o melhor resultado foi a araldite 10 minutos	
Tubo de pvc com parede de três milímetros	1	Testado em imersão em gasolina comum durante 1 semana	Não apresentou nenhum tipo de reação com a gasolina	
Durepox	X	Testado em imersão em gasolina comum durante 1 semana	Apresentou pequena reação aparecendo uma fase escura na gasolina, provavelmente componentes que reagiram com a gasolina comum.	Apesar de ter apresentado uma espécie de reação com a gasolina, este material foi utilizado em partes exteriores do “aquário” que não entram em contato com a gasolina.
Tubo de pvc interno	1	Testado em imersão em gasolina comum durante 1 semana	Não apresentou nenhum tipo de reação com a gasolina	

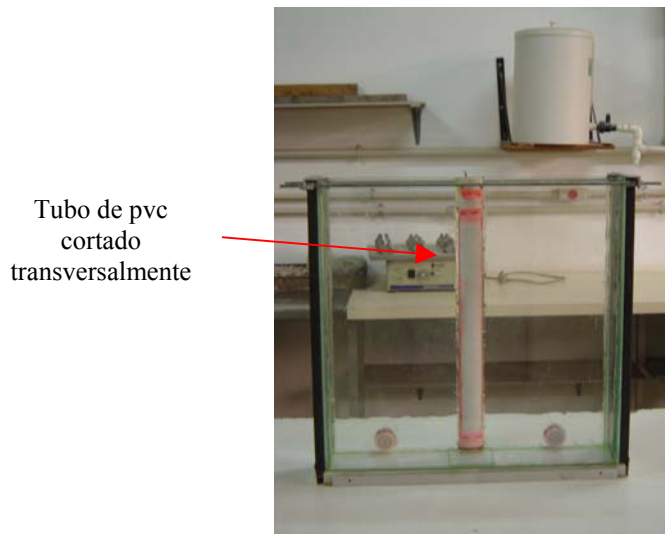


Material	Quantidade	Teste	Reação	Observação
Cola araldite 24 horas		Testado em imersão de gasolina comum durante dois dias	Apresentou reação com a gasolina	Devido à reação com a gasolina foi descartada a sua utilização na montagem do “aquário”
Cola araldite 10 minutos		Testado em imersão em gasolina comum durante aproximadamente uma semana	Não apresentou reações visíveis com a gasolina comum	Devido ao bom resultado com a gasolina comum foi escolhida para a montagem do “aquário”.
Tela de pvc	Retalho de 10 x 10 cm	Testado em imersão em gasolina comum durante aproximadamente uma semana	Não apresentou reações visíveis com a gasolina comum	
Esferas de vidro		Testado em imersão em gasolina comum durante aproximadamente uma semana	Não apresentou nenhum tipo de reação com a gasolina	

Duas placas de vidro laterais foram coladas em placas de madeira para ajudar no reforço da estrutura lateral. As demais placas de vidro foram juntas com cola araldite 10 minutos e reforçadas tanto na base quanto no topo com parafusos, evitando torções da estrutura para os lados (figura 10).



Um tubo de pvc ranhurado com 50 cm de comprimento foi cortado diametralmente e colado do lado de dentro do vidro para simular o poço de monitoramento. Uma tela de pvc foi fixada ao redor do tubo de pvc para impedir que esferas passassem pelas ranhuras e entupissem o poço (figura 11).



**Figura 11:** Aquário vazio antes de iniciados os ensaios

Um outro tubo de pvc de menor diâmetro foi preparado de modo a se encaixar entre o tubo maior e o vidro, funcionando como um tipo de vedação para o poço de monitoramento. Para que a vedação funcionasse bem o tubo interno foi revestido com filme de pvc e vedado com durepoxi tanto na sua parte inferior quanto na sua parte superior. Na parte superior foi instalada uma alavanca com um anel que permitisse a retirada do tubo interno com facilidade, por último a vedação de pvc foi revestida com cola araldite 10 minutos (figura 12).



**Figura 12:** Tubo interno, a vedação ajuda a impedir a entrada de água no poço de monitoramento.

Depois de montado o aquário passou por inúmeros testes para verificar a existência de furos, que comprometeriam todo o ensaio, alterando os níveis de água no poço e no “aquífero” e também os níveis de gasolina. Os furos detectados foram fechados com cola araldite 10 minutos, além de borracha de silicone pelo lado externo do aquário (figura 13).



**Figura 13:** Aquário sendo testado antes de iniciar cada ensaio, a presença de furos cancelaria todo o ensaio.

A escolha do material que comporia o solo do aquífero foi feita através de testes com diferentes tipos de materiais. Primeiramente utilizou-se areia de granulometria média, porém por possuir muitas impurezas que deixavam a água com uma aparência turva, prejudicando a observação da fase dissolvida ou fase de transição, e do nível d'água tanto no poço de monitoramento quanto no "aquífero", esse material foi descartado.

A praticidade na lavagem também foi um dos motivos que mais pesou na escolha do tipo de material que seria utilizado. Se a areia fosse utilizada teria que ser descartada devido a dificuldade na sua limpeza, e a dificuldade em se encontrar locais apropriados para o seu descarte foi também um dos principais motivos em se procurar materiais que pudessem ser lavados de maneira fácil e assim reaproveitados com segurança.

As esferas de vidro da Potters Industrial Ltda. se encaixaram de maneira adequada nas características do material procurado para este tipo de experimento, e as suas propriedades físicas e químicas são garantidas pelo fabricante.

As esferas são fabricadas principalmente para o uso de demarcações refletorizadas em vias utilizadas por veículos. Misturadas na tinta que desenha os limites das rodovias, as esferas refletem as luzes dos faróis à noite, permitindo aos motoristas viajarem com segurança nos períodos de menor quantidade de luz natural.

Para os ensaios de contaminação de aquífero, as esferas mostraram ser a melhor opção devido à praticidade de manuseio e também por apresentarem características conhecidas e garantidas pelo fabricante, além de se adequarem quanto à individualização das diferentes zonas do solo, tornando as medidas mais precisas (tabela 8 e figura 14).

**Tabela 8:** Propriedades físicas e químicas das esferas de vidro. (Manual do produto fornecido pelo fabricante).

<b>Propriedades</b>	
<b>Físicas</b>	
Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,5
Densidade de massa (g/cm <sup>3</sup> )	2,5
Índice de refração	1,5 – 1.52
Resistência a compressão (psi)	14.000 - 36.000
Dureza MOH	5 – 6
Dureza Knoop 100g carga	515 Kg/mm <sup>2</sup>
Coefficiente estatístico de fricção	0,9 – 1,0
<b>Químicas</b>	
Composição	Vidro tipo soda-cal
Sílica livre	nenhuma



**Figura 14:** Preenchimento do aquário com areia, formando a zona saturada do solo.

Uma sequência de processos foi obedecida para que o aquário fosse preenchido, de maneira que todas as zonas ficassem visíveis durante o ensaio. Primeiramente o poço de monitoramento é fechado com tubo interno anteriormente preparado então o aquário é preenchido com água destilada até um nível preestabelecido, então as esferas de vidro são cuidadosamente adicionadas para formar a zona saturada do aquífero.

À medida que as esferas são adicionadas, o nível d'água sobe, pois passa a existir menos volume de vazios. Quando o volume criado pelos poros se iguala ao volume de água, o nível d'água não sobe mais, então a adição de esferas de vidro continua e a zona não saturada começa a aparecer (figuras 15 e 16).

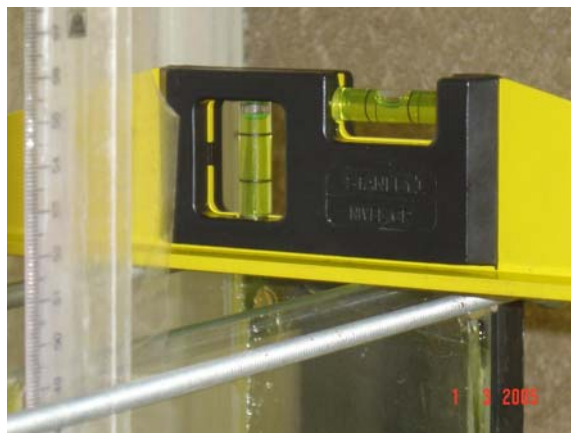
Durante as etapas de preenchimento do aquário um nível horizontal e um vertical são colocados sobre as placas de vidro do aquário para detectar qualquer inclinação anormal. (figura 17).



**Figura 15:** A zona saturada e a zona insaturada estão bem individualizadas, além da presença da franja capilar provocada pela tensão interfacial entre o líquido molhante (água) e o sólido (esferas de vidro).



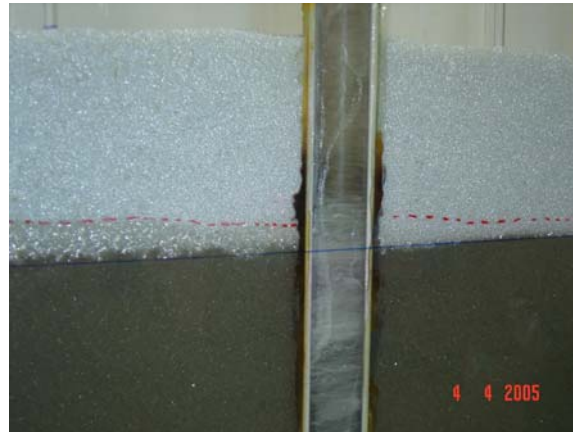
**Figura 16:** Franja capilar de água marcada. A franja capilar não mantém a mesma espessura em toda a extensão do aquífero.



**Figura 17:** Nível posicionado sobre as duas placas de vidro do aquário para garantir que nenhuma inclinação ocorra durante os ensaios.

São esperados aproximadamente três dias para que uma franja capilar de água possa ser formada, esse tempo foi estimado a partir de observações em frascos contendo esferas de vidro e água, sendo observado também que o tempo não foi igual para todas as granulometrias e também nem todas formaram franjas visíveis.

As condições iniciais do “aquífero” devem ser observadas e anotadas como, por exemplo, o nível d’água e a altura da franja capilar, que devem ser marcadas com canetas retroprojetor. Também é aconselhável compor um arquivo fotográfico mostrando as respectivas condições, que podem ser chamadas de pré-contaminação (figura 18).



**Figura 18:** Medidas das condições pré-contaminação devem ser anotadas para posterior comparação com os demais dados.

A distância do topo da “areia” até o topo da franja capilar é medida, e marcada nos funis que serão utilizados para realizar a contaminação no “aquífero”, de maneira que a gasolina quando injetada, preencha os poros logo acima da franja capilar de água, em um movimento de baixo para cima, expulsando o ar contido na zona não saturada, formando uma segunda zona saturada, porém com gasolina.

Dois funis de vidro são utilizados para realizar a contaminação no aquífero, simulando dois vazamentos subterrâneos pontuais. Através deles são injetados 800 ml de gasolina com corante vermelho e em cada um dos funis são injetados 400 ml de gasolina (figura 19).



**Figura 19:** Funis posicionados para a injeção de gasolina no aquífero

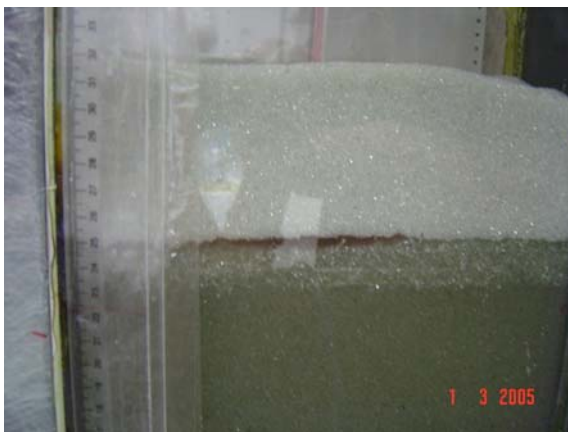


A gasolina, que pode ser a gasolina pura ou gasolina E-25, é misturada com corante vermelho utilizando-se de 1 a 2 gotas, que são suficientes para dois litros. Segundo Ferreira (2000) a presença do corante na gasolina não altera suas propriedades físicas e químicas e durante o experimento, nenhum tipo de interação entre o corante e a água foi observado (figura 20).



**Figura 20:** Gasolina misturada com corante vermelho, separada em dois beakers com 400mL cada.

A gasolina migra verticalmente e lateralmente sob influência das forças capilares e da gravidade respectivamente, ocupando os espaços vazios acima da franja capilar. (figuras 21 e 22).



**Figura 21:** No início da contaminação, a gasolina migra lateralmente e verticalmente, ocupando espaços vazios acima da franja.

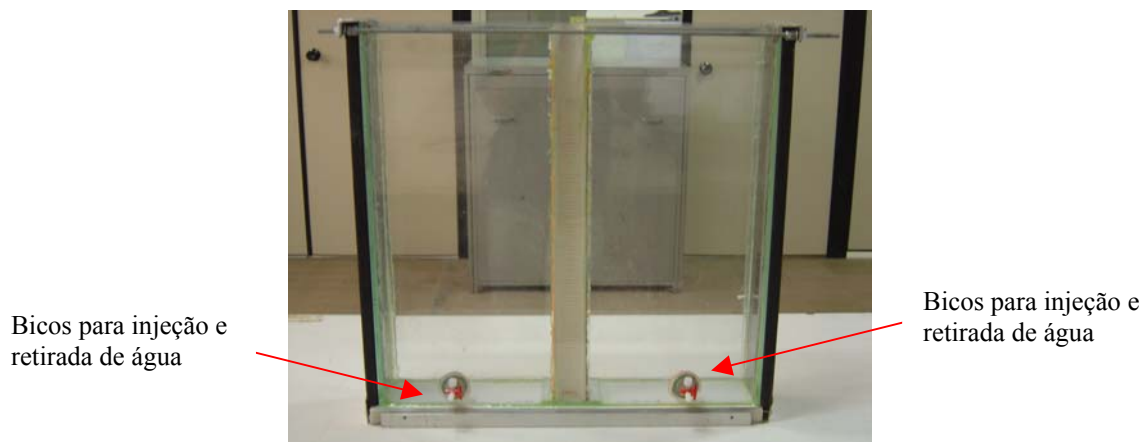
Finalizada toda a seção de preparação do “aquífero”, incluindo a contaminação com gasolina, está pronta a condição inicial. São realizadas novas medidas, dessa vez incluindo os valores correspondentes às espessuras de fase livre no aquífero e franja capilar de gasolina, além das medidas de nível d’água e franja capilar de água. Quando são feitas essas medidas o poço de monitoramento ainda está fechado (figura 22).



**Figura 22:** Após a contaminação, é formada a fase livre acima da franja capilar de água. Também é possível observar que a gasolina invade uma grande parte da franja capilar.

Uma tabela contendo todas as informações necessárias para o melhor acompanhamento do experimento foi desenvolvida. Nela são anotados os dados recolhidos durante o decorrer do ensaio para que, posteriormente, seja feita a análise e a composição de gráficos.

Com a abertura do poço, ocorre uma queda no nível d'água do “aquífero”, uma vez que o sistema é fechado e não existe contato com fontes d'água exteriores. Para solucionar este problema foi desenvolvido um sistema que permite a injeção de água no aquário pela parte inferior do mesmo, para que a saturação ocorra de baixo para cima, processo chamado de restituição (figura 23).



**Figura 23:** detalhe do aquário ainda vazio, os bicos para injeção e retirada de água instalados próximos a base. (a saturação deve ocorrer de baixo para cima).



A importância de se realizar a restituição está no fato de que o nível d'água regional de um aquífero não é significativamente afetado pela abertura de um poço de monitoramento, sendo por isso necessária a retomada das condições iniciais, antes de se iniciar o ensaio.

A segunda fase do ensaio, iniciada com a abertura do poço de monitoramento, consiste em acompanhar e medir as variações dos seguintes parâmetros:

- Nível d'água no aquífero
- Nível d'água no poço de monitoramento
- Franja capilar de água
- Fase livre de gasolina no aquífero
- Franja capilar de gasolina
- Fase livre no poço de monitoramento
- Fase dissolvida, quando esta existir

Uma tabela preparada anteriormente, contendo colunas para todos os parâmetros, será preenchida no decorrer do ensaio.

## 5- Ensaio

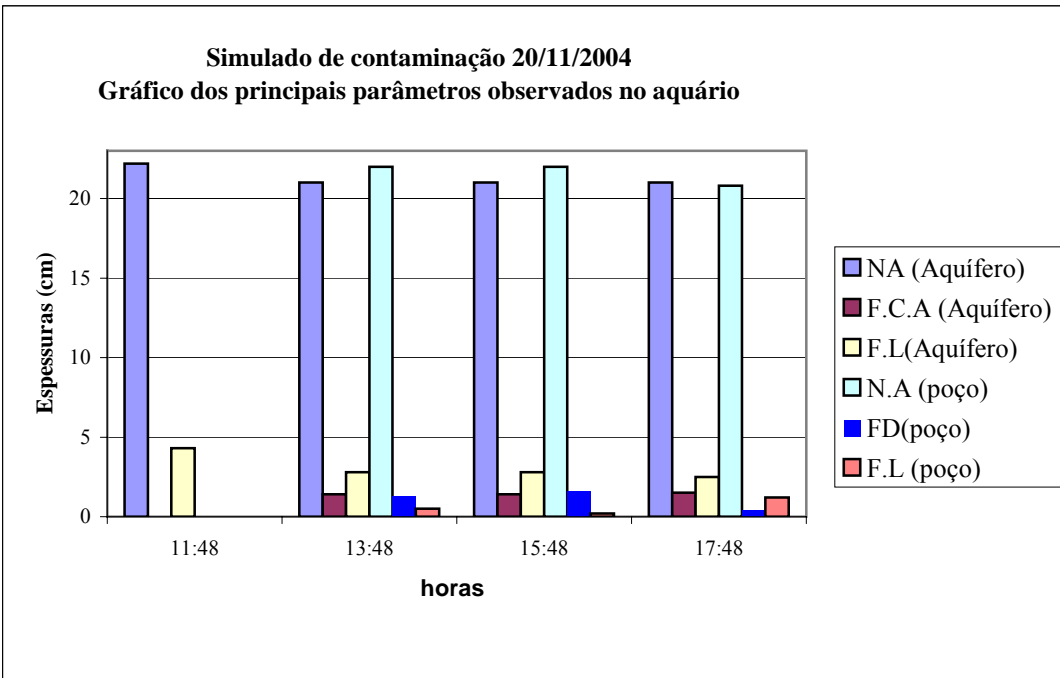
### 5.1- Ensaio 1

O primeiro ensaio realizado ocorreu em 20 de novembro de 2004, no laboratório de Via Úmida do Departamento de Geologia da UFRJ. Foram utilizados 800 ml de gasolina E-25 previamente misturados com corante vermelho. Separados em dois baillers com 400 ml cada, a gasolina foi injetada simultaneamente no aquífero utilizando-se dois funis de vidro, de modo que a contaminação fosse homogênea dos dois lados.

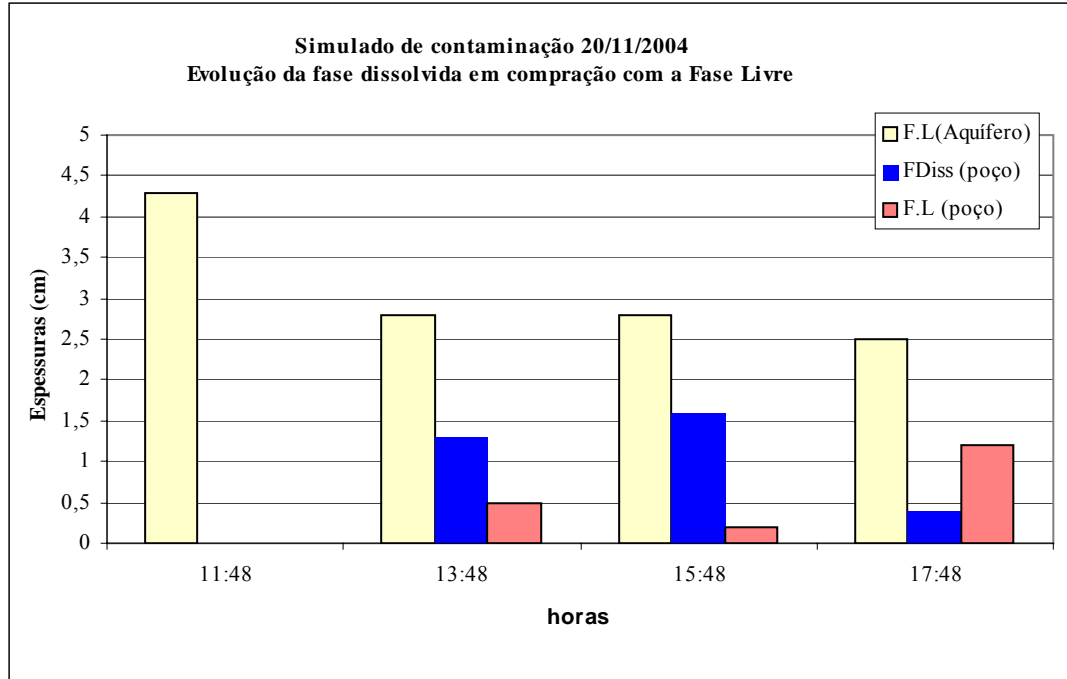
Depois de realizada a injeção, o poço de monitoramento foi aberto. Como era o primeiro ensaio realizado, o problema da queda no nível d'água com a abertura do poço ainda não havia sido pensado e optou-se por continuar o ensaio durante 6 horas. Nesse tempo, o comportamento da gasolina E-25 quando em contato direto com a água do aquífero e do poço foi observado cuidadosamente, e os principais parâmetros necessários ao entendimento do comportamento foram anotados, para elaboração de tabelas e gráficos (tabela 9 e gráficos 1 à 4).

**Tabela 9:** dados do primeiro ensaio realizado com a gasolina E-25

Contaminação simulada em 20 de Novembro de 2004							
Aquífero					Poço		
Hora	N.A	F.C.A	F.L.G	F.C.G	N.A	F.D	F.L
11:48	22,2	0	4,3	0	0	0	0
13:48	21	1,4	2,8	0	22	1,3	0,5
15:48	21	1,4	2,8	0	22	1,6	0,2
17:48	21	1,5	2,5	0	20,8	0,4	1,2

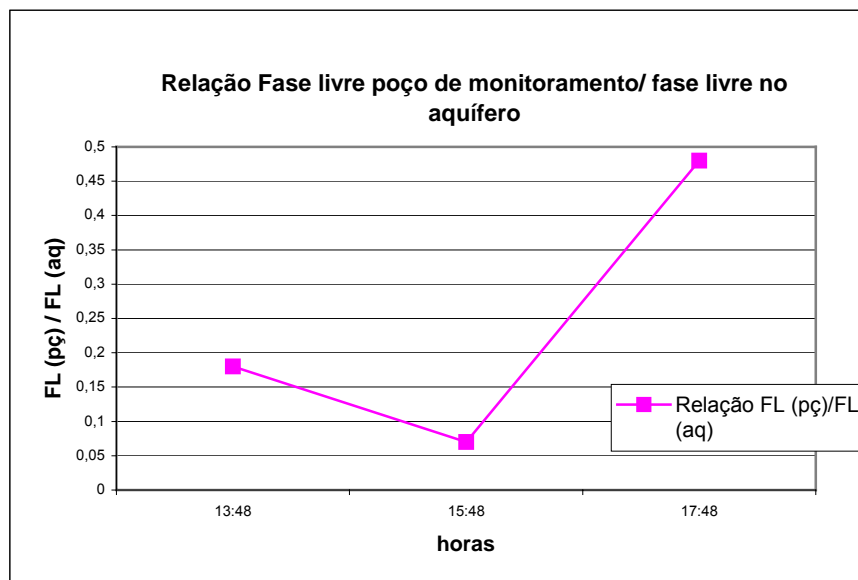


**Gráfico 1:** Dados do primeiro ensaio com E-25, plotados em forma de gráfico.



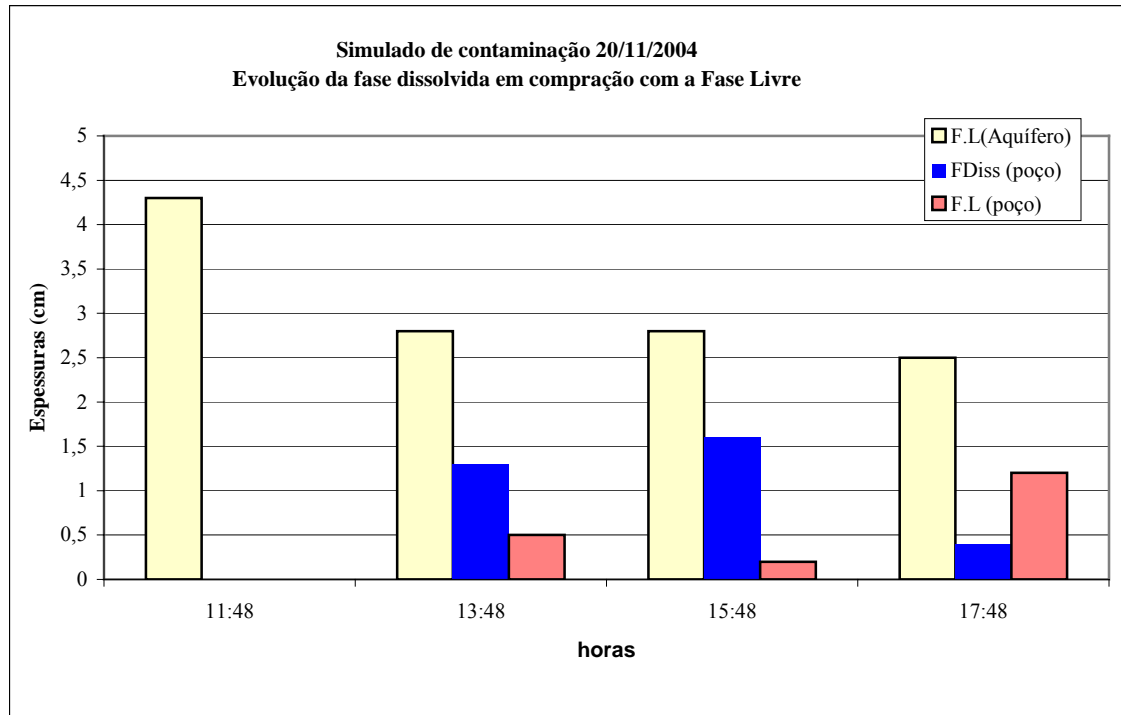
**Gráfico 2:** Gráfico comparativo entre as espessuras de gasolina no poço de monitoramento e no aquífero (20 de novembro 2004).

A partir desse gráfico, observamos que a relação entre a espessura de fase livre no poço de monitoramento e no aquífero diminui e depois aumenta com o tempo. Esse comportamento ocorre devido ao comportamento da co-solvência, que provoca o aumento da solubilidade de alguns constituintes da gasolina, alterando a espessura de gasolina no poço, e conseqüentemente alterando a relação entre as espessuras (gráfico 3).



**Gráfico 3:** Relação entre as espessuras de fase livre no poço de monitoramento e no aquífero

A zona de transição ou fase dissolvida é observada devido à presença do etanol na gasolina. O etanol é muito solúvel em água, e a solução formada pela mistura de etanol e água ajuda a dissolver os compostos da gasolina na água principalmente os BTEX (gráfico 4).



**Gráfico 4:** Evolução da espessura da zona de transição (fase dissolvida) em comparação com a fase livre no sistema

## 5.2- Ensaio 2

A gasolina E-25 também foi utilizada no segundo ensaio, que ocorreu em Dezembro de 2004. A mesma seqüência de contaminação do ensaio 1 também foi adotada no segundo.

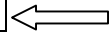
Para o segundo ensaio, adotou-se um padrão diferente de anotações para os parâmetros. Durante os primeiros 30 minutos, as anotações foram realizadas em intervalos de cinco em cinco minutos e, após meia hora, foram realizadas a cada 50 / 60 minutos.

A duração do segundo ensaio foi a mesma do primeiro, porém, este fato não foi intencional - um vazamento na lateral do aquário impediu que o ensaio continuasse, e apenas os dados adquiridos antes do vazamento puderam ser considerados.

Em vermelho está o momento em que foi feita a restituição do nível d'água.

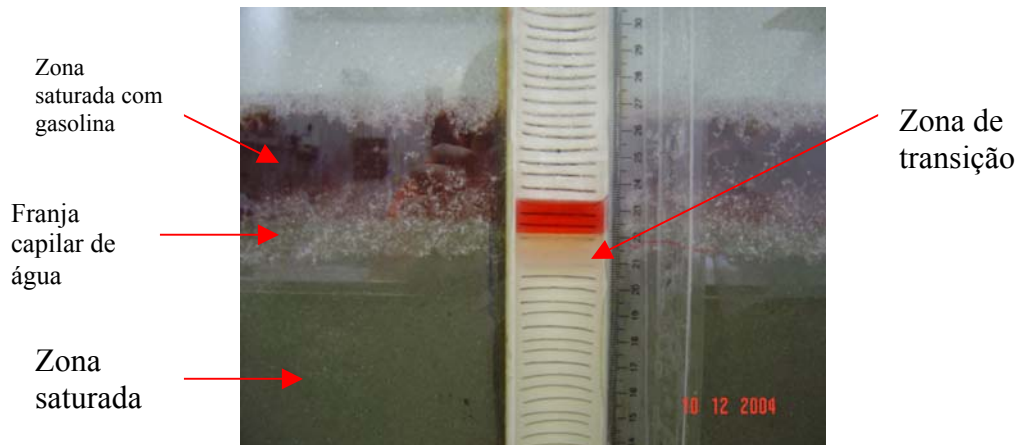
**Tabela 10:** Parâmetros anotados no decorrer do segundo ensaio. A linha em vermelho e a seta indicam o momento em que foi realizada a restituição do nível d'água no aquífero.

Simulação realizada em 10 de Dezembro de 2004							
Hora	Aquífero				Poço		
	N.A (cm)	FCA (cm)	FL (cm)	FCG (cm)	NA (cm)	FL (cm)	FDISS (cm)
09:20	21,5	2	2,7	0	21,1	2,4	0
09:25	21,5	2	2,7	0	21,3	2,2	0
09:30	21,5	2	2,7	0	21	2	0,5
09:35	21,5	1,2	3,5	0	21	1,6	0,5
09:40	21,5	1	3,5	0	21	1,7	0,8
09:55	21,5	1	3,5	0	21	1,5	1
10:10	21,5	1,2	3	0,2	20,5	1,2	1,7
11:00	21	1,3	3	0,2	20,5	0,9	1,9
13:00	21	2	3	0,2	20,2	0,7	2,1
13:10	21,5	2	3	0,2	21	2,2	2
14:10	21,5	1,7	2,8	0,2	20,6	1,3	2,2
15:10	21,5	1,8	2,7	0,2	20,8	1	2,2



A fase livre no aquífero aumenta de espessura após 15 minutos de ensaio. Esse fenômeno pode ser atribuído ao fato de que a gasolina continua se movendo para baixo dentro do aquífero, penetrando na franja capilar de água (a franja capilar diminui de espessura).

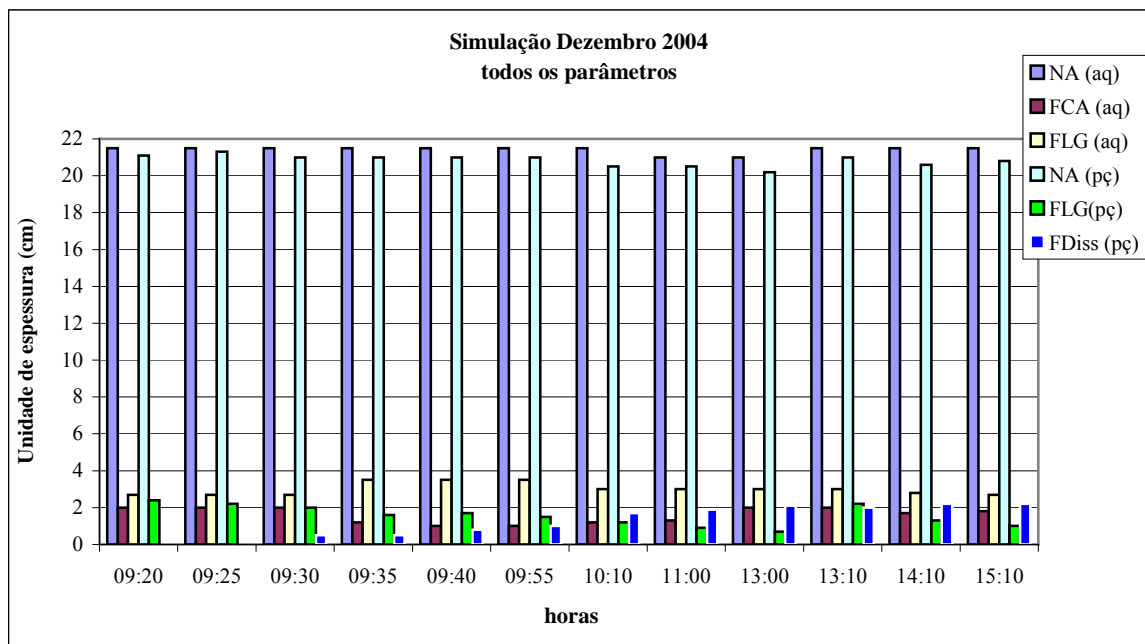
A zona de transição entre a água e gasolina no poço de monitoramento, chamada de fase dissolvida, aparece com apenas 10 minutos de ensaio, e continua crescendo até as 14:10, entretanto, como o ensaio foi interrompido por um vazamento, não podemos afirmar que o valor alcançado se estabilizaria (figura 24).



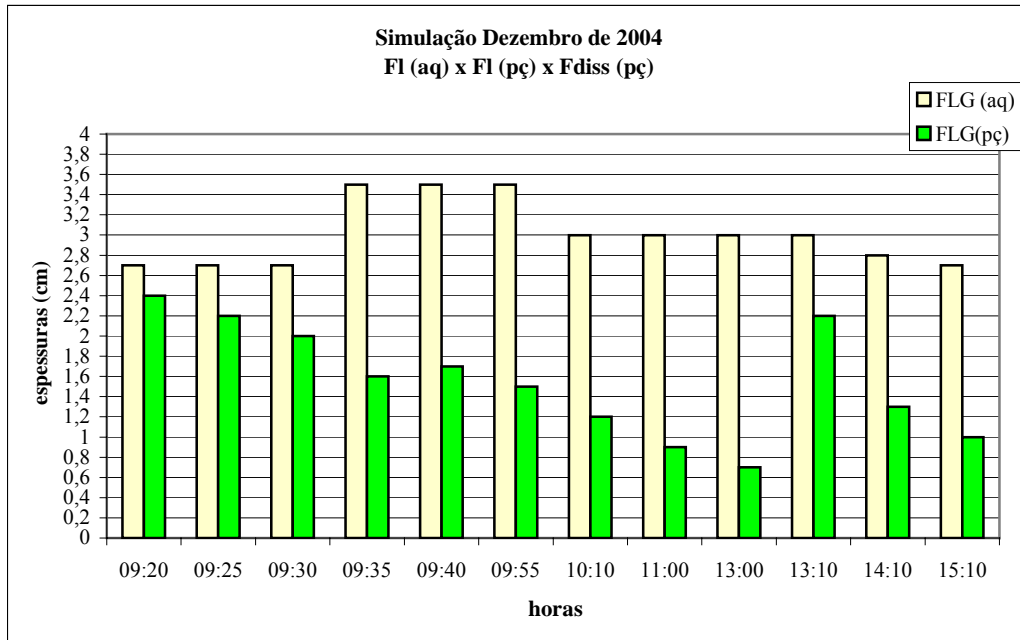
**Figura 24:** Zona de transição pode ser observada logo no início do ensaio.

Pode-se observar que a espessura de fase livre no poço de monitoramento aumenta consideravelmente com a restituição do nível d'água no aquífero. Esse fenômeno provavelmente ocorre porque, quando a água é injetada no aquífero, ela empurra para cima a mesma quantidade de água, e assim a gasolina também é empurrada, mas as forças interfaciais e a força da gravidade fazem com que a gasolina migre para o poço por ser o caminho que oferece menor resistência à sua passagem, aumentando a espessura de gasolina e elevando o NA no poço de monitoramento.

Mesmo após o aumento da espessura de gasolina dentro do poço de monitoramento, esta continua a diminuir devido à presença do etanol que contribui para solubilização acelerada dos compostos da gasolina, principalmente os BTEX (gráfico 5).



**Gráfico 5:** Evolução dos parâmetros anotados durante o ensaio

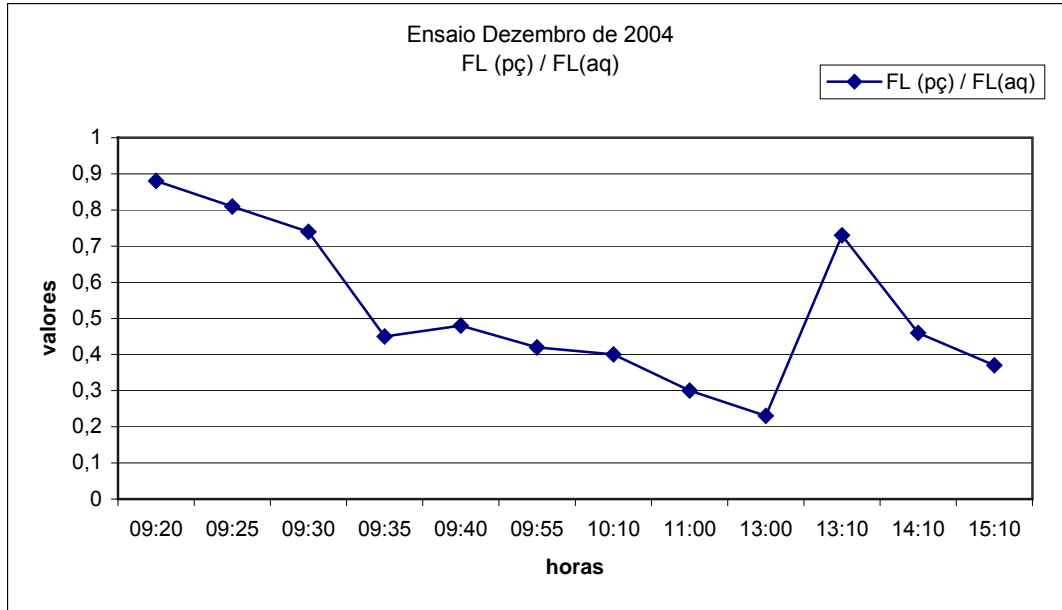


**Gráfico 6:** Relação entre as espessuras de fase livre no poço de monitoramento e no aquífero

A relação entre a fase livre no poço de monitoramento e no aquífero varia no decorrer do ensaio. Partindo aproximadamente da mesma espessura, a fase livre no poço de monitoramento decresce rapidamente, voltando a subir após a restituição e diminuindo no decorrer do ensaio.

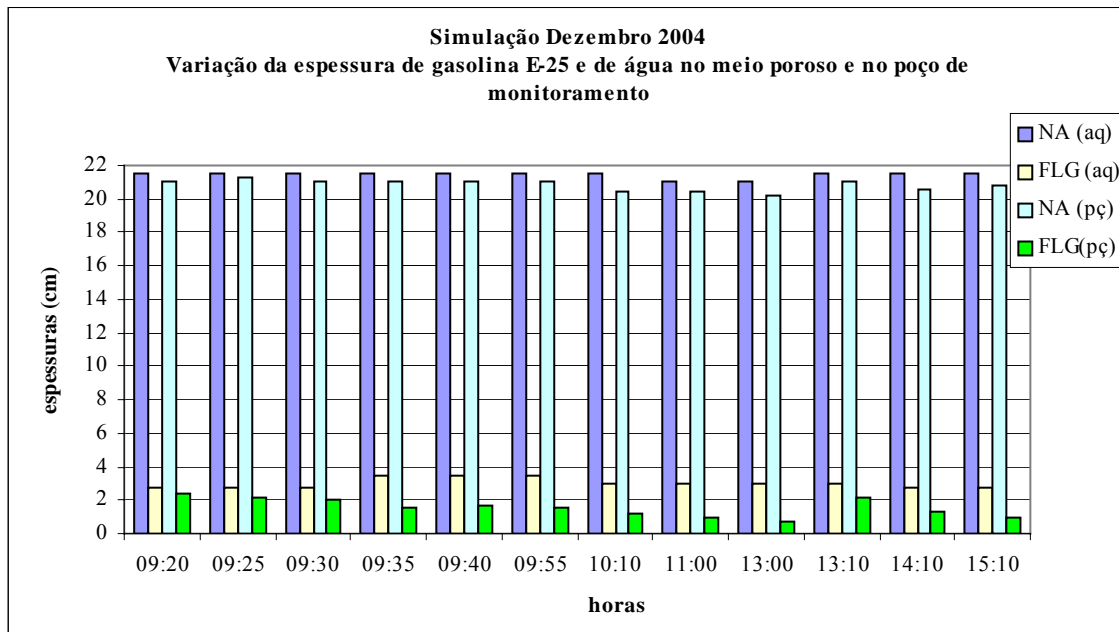
**Tabela 11:** Relação FL (pç) / FL (aq) em função do tempo

Tempo	FL (pç) / FL (aq)
09:20	0,88
09:25	0,81
09:30	0,74
09:35	0,45
09:40	0,48
09:55	0,42
10:10	0,4
11:00	0,3
13:00	0,23
13:10	0,73
14:10	0,46
15:10	0,37



**Gráfico 7:** Relação entre as espessuras de fase livre no poço de monitoramento e no meio poroso.

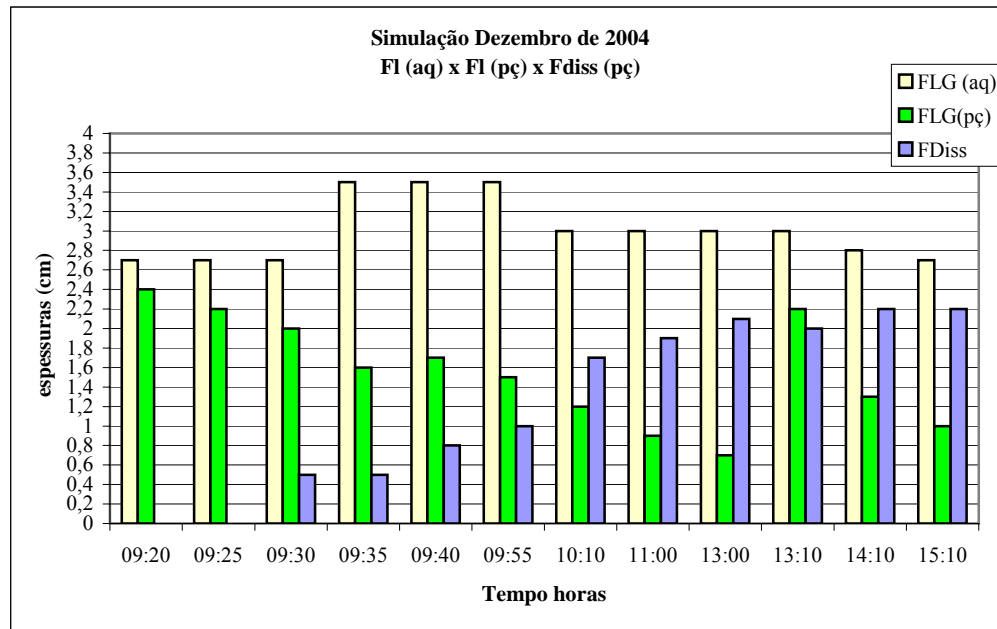
Às 13:00, a restituição do nível d'água provocou um aumento na espessura da fase livre no poço de monitoramento, aumentando assim a relação entre FL (pç) / FL (aq), entretanto, a relação volta a diminuir, porém mais lentamente, no decorrer do ensaio, pois o valor de 0,46 é observado novamente somente após 1 hora da entrada de gasolina no poço, sendo que o mesmo valor foi observado em um intervalo de 5 minutos do início do ensaio.



**Gráfico 8:** Variação da espessura de gasolina E-25 e de água no meio poroso e no poço de monitoramento



A coluna d'água no meio poroso se mantém praticamente estável, sendo necessária apenas uma restituição às 13:00 horas.



**Gráfico 9:** variação da fase livre no meio poroso e no poço de monitoramento e de fase dissolvida no poço de monitoramento.

O aumento da zona de transição (fase dissolvida) no poço de monitoramento, evidenciado pela dissolução de BTEX e etanol na água, resultou numa redução de até 70% na espessura de fase livre no poço (figura 25).



**Figura 25:** Zona de transição apresentando uma espessura maior no final do experimento

### 5.3- Ensaio 3

Em março de 2005 foi realizado o terceiro ensaio com gasolina E-25. O ensaio de março durou 7 dias, sendo 6 dias de contaminação e um dia de desmobilização do sistema (limpeza dos materiais). Adquirida a experiência na realização dos outros ensaios pode-se dizer que este foi o mais completo envolvendo a gasolina E-25, onde os parâmetros foram observados com mais cuidado (tabela 12 e 13).

**Tabela 12:** Dados referentes à observação no meio poroso (aquífero) no ensaio de Março de 2005

Aqüífero							
NA (cm)	FCA (cm)	F radial (cm)	FLG (cm)	FCG (cm)	hora	Tempo (hrs)	Data
23	1	0	0	0	12:39	0	1/mar
23	1,3	0	3,7	0,5	12:40	0	1/mar
23	1	0	4	0,5	12:41	0,02	1/mar
23	1	0	3,8	0,7	12:42	0,03	1/mar
23	1	0	3,8	0,7	12:43	0,05	1/mar
23	1	0	3,8	0,7	12:44	0,06	1/mar
23	1	0	3,8	0,7	12:45	0,08	1/mar
23	1	0	3,8	0,7	12:46	0,10	1/mar
23	1	0	3,8	0,5	12:47	0,11	1/mar
23	1	0	3,8	0,5	12:48	0,13	1/mar
23	1	0	3,8	0,5	12:49	0,15	1/mar
23	1	0	3,8	0,5	12:50	0,16	1/mar
23	1	0	3,8	0,5	12:52	0,20	1/mar
23	1	0	3,8	0,5	12:55	0,25	1/mar
23	1	0	3,8	0,5	13:00	0,33	1/mar
23	1	0	3,8	0,5	13:05	0,41	1/mar
23	1	0	3,8	0,5	13:10	0,50	1/mar
23	1	0	3,8	0,5	13:15	0,58	1/mar
23	1,3	0	3,8	0,5	13:20	0,66	1/mar
23	1,3	0	3,8	0,5	13:25	0,75	1/mar
23	1,3	0	3,8	0,5	13:30	0,83	1/mar
23	1,3	0	3,8	0,5	13:35	0,91	1/mar
23	1,3	0	3,8	0,5	13:40	1,00	1/mar
23	1,4	0	3,4	0,2	13:50	1,16	1/mar
23	1,4	0	3,4	0,2	14:00	1,33	1/mar
22,8	1,5	0	3,3	0,2	14:10	1,50	1/mar
23	1,5	0	3,3	0,2	14:20	1,66	1/mar
23	1,5	0	3,3	0,2	14:40	2,00	1/mar
23	1,5	0	3,3	0,3	15:00	2,33	1/mar
23	1,5	0	3,3	0,2	15:20	2,66	1/mar
23	1,5	0	3,3	0,2	15:40	3,00	1/mar
22,7	1,9	0	3,1	0,2	16:00	3,33	1/mar
23	1,5	0	3,3	0,2	16:20	3,66	1/mar
23	1,5	0	3,2	0,2	16:40	4,00	1/mar
23	1,5	0	3,3	0,2	17:00	4,33	1/mar
23	1,5	0	3,3	0,2	17:20	4,66	1/mar

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ 2005/1

23	1,6	0	3,3	0,2	17:40	5,00	1/mar
23	1,6	0	3,3	0,2	18:00	5,33	1/mar
22,5	2,5	0	2,3	1,2	09:30	20,83	2/mar
22,5	2,5	0	2,3	1,2	10:30	21,83	2/mar
22,3	2,4	0	2,5	1,3	11:30	22,83	2/mar
22,5	2,5	0	2,2	1,3	12:50	24,13	2/mar
22,5	2,5	0	2,2	1,3	13:50	25,13	2/mar
22,5	2,5	0	2,2	1,3	14:50	26,13	2/mar
22,5	2,5	0	2,2	1,3	15:50	27,13	2/mar
22,5	2,5	0	2,2	2,5	09:00	44,29	3/mar
23	1,6	3,3	1,6	0,7	10:10	141,45	7/mar
23	1,6	3,8	2,1	0	10:15	141,53	7/mar
23	1,6	3,8	2,1	0	10:18	141,58	7/mar
23	1,6	3,8	2,1	0	10:20	141,61	7/mar
23	1,6	3,8	2,1	0	10:25	141,69	7/mar
23	1,6	3,8	2,1	0	10:30	141,77	7/mar
23	1,6	3,8	1,9	0	10:40	141,94	7/mar
23	1,6	3,8	1,9	0	11:10	142,44	7/mar
23	1,6	3,8	1,9	0	11:30	142,77	7/mar
23	1,6	3,8	1,9	0	11:50	143,11	7/mar
23	1,7	3	1,8	0	13:40	144,94	7/mar
23	1,7	3	1,8	0	14:30	145,77	7/mar

**Tabela 13:** dados referentes à observação do poço de monitoramento no ensaio de março de 2005

Poço					
NA (cm)	FLG (cm)	FDISS (cm)	hora	Tempo (hrs)	Data
0	0	0	12:39	0	1/mar
23,5	2,5	0	12:40	0	1/mar
23,5	2,5	0	12:41	0,02	1/mar
23,5	2,5	0,3	12:42	0,03	1/mar
23,5	2,5	0,5	12:43	0,05	1/mar
23,5	2,5	0,8	12:44	0,06	1/mar
23,5	2,5	0,8	12:45	0,08	1/mar
23,5	2,5	1	12:46	0,10	1/mar
23,6	2,4	1,1	12:47	0,11	1/mar
23,6	2,4	1	12:48	0,13	1/mar
23,7	2,3	1	12:49	0,15	1/mar
23,8	2,2	1	12:50	0,16	1/mar
23,8	2,2	0,9	12:52	0,20	1/mar
23,8	2,2	1	12:55	0,25	1/mar
24	2	1,3	13:00	0,33	1/mar
24	2	1,3	13:05	0,41	1/mar
24	2	1,3	13:10	0,50	1/mar
24	2	1,3	13:15	0,58	1/mar
24,1	1,8	1,3	13:20	0,66	1/mar
24,1	1,8	1,3	13:25	0,75	1/mar
24,1	1,7	1,4	13:30	0,83	1/mar

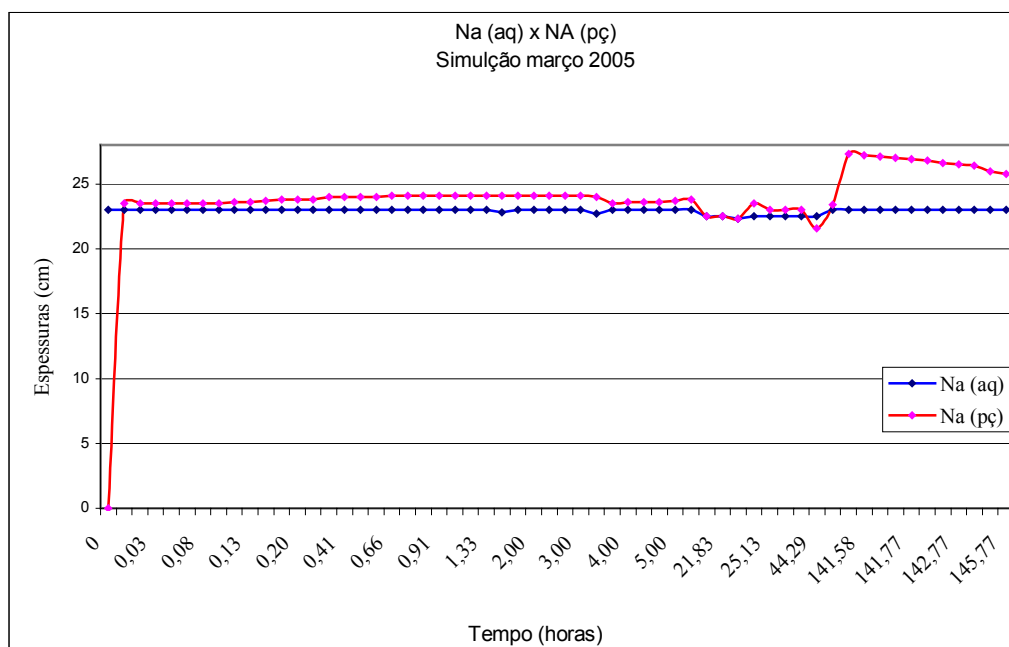
24,1	1,7	1,4	13:35	0,91	1/mar
24,1	1,7	1,4	13:40	1,00	1/mar
24,1	1,6	1,6	13:50	1,16	1/mar
24,1	1,5	1,6	14:00	1,33	1/mar
24,1	1,5	1,4	14:10	1,50	1/mar
24,1	1,4	1,4	14:20	1,66	1/mar
24,1	1,2	1,4	14:40	2,00	1/mar
24,1	1,2	1,4	15:00	2,33	1/mar
24,1	0,8	1,8	15:20	2,66	1/mar
24,1	0,8	1,8	15:40	3,00	1/mar
24	0,8	1,7	16:00	3,33	1/mar
23,5	1,5	1,2	16:20	3,66	1/mar
23,6	1,4	1,1	16:40	4,00	1/mar
23,6	1,2	1,1	17:00	4,33	1/mar
23,6	1,1	0,9	17:20	4,66	1/mar
23,7	1	1,2	17:40	5,00	1/mar
23,8	0,9	1	18:00	5,33	1/mar
22,5	1,5	0	09:30	20,83	2/mar
22,5	1,5	0	10:30	21,83	2/mar
22,3	1,5	0	11:30	22,83	2/mar
23,5	1,5	0,7	12:50	24,13	2/mar
23	1,7	0,5	13:50	25,13	2/mar
23	1,7	0,5	14:50	26,13	2/mar
23	1,7	0,5	15:50	27,13	2/mar
21,6	2	0	09:00	44,29	3/mar
23,4	2,4	0	10:10	141,45	7/mar
27,3	1,2	0	10:15	141,53	7/mar
27,2	1,3	0	10:18	141,58	7/mar
27,1	1,4	0	10:20	141,61	7/mar
27	1,4	0	10:25	141,69	7/mar
26,9	1,5	0	10:30	141,77	7/mar
26,8	1,6	0	10:40	141,94	7/mar
26,6	1,7	0	11:10	142,44	7/mar
26,5	1,8	0	11:30	142,77	7/mar
26,4	1,9	0	11:50	143,11	7/mar
26	1,9	0	13:40	144,94	7/mar
25,8	2	0	14:30	145,77	7/mar

Durante o ensaio, foram realizadas quatro restituições do nível d'água no aquífero, marcadas com cor vermelha na tabela. A restituição tem como objetivo manter o nível d'água inicial do experimento. Embora esta medida não reflita a realidade natural, onde o nível d'água de um aquífero está em constante mudança, ela ajuda a tornar o ensaio mais simples, permitindo uma melhor comparação entre os parâmetros analisados.

O nível d'água no aquífero, apesar de ter sido restituído quatro vezes, não se alterou consideravelmente e pode-se dizer que ele se manteve constante durante a maior parte do experimento. Em relação ao nível d'água no poço de monitoramento, as variações foram bem mais consideráveis, devido principalmente a dois motivos (gráfico 10).

Primeiro, porque o poço de monitoramento sofre influência direta da restituição do nível d'água. Quando a água é injetada no aquário ela tende a seguir pelo caminho que oferece menor resistência à sua passagem. No meio poroso existe a tensão interfacial responsável pela formação da capilaridade, além do peso da coluna d'água já presente no aquário. A água tende a fluir para o poço de monitoramento, onde a tensão interfacial é muito menor do que a encontrada no meio poroso.

Segundo, porque, quando a água entra em contato com a gasolina com etanol, forma uma zona de transição, e o sistema se torna instável variando constantemente a espessura de gasolina no poço e, assim, o seu peso sobre a coluna d'água. A presença do álcool promove a diluição dos compostos mais solúveis da gasolina (BTEX) e, então, essa fase passa a ser composta por uma mistura de água + compostos de gasolina + etanol, cuja a densidade também varia muito, ou seja, as mudanças constantes de densidade e espessura de contaminantes no poço de monitoramento acabam por modificar o nível d'água.



**Gráfico 10:** Variação dos níveis d'água no poço de monitoramento e no aquífero ensaio de março de 2005

Em relação à zona de transição, sua espessura atinge 1,3 cm com 0,33 hrs de ensaio, e pode-se notar que sua espessura chega a ultrapassar a espessura de fase livre com apenas 1,33 hora de ensaio. Após 3 horas de ensaio, quando a fase dissolvida atinge o seu valor máximo de 1,8 cm, ela então começa a diminuir e não é mais observada no poço de monitoramento com 20,83 horas de ensaio, sendo que a última anotação observada havia sido feita com 5,33 horas, concluindo-se que nesse intervalo, a fase dissolvida visível, formada pelo efeito da co-solvência, havia desaparecido.

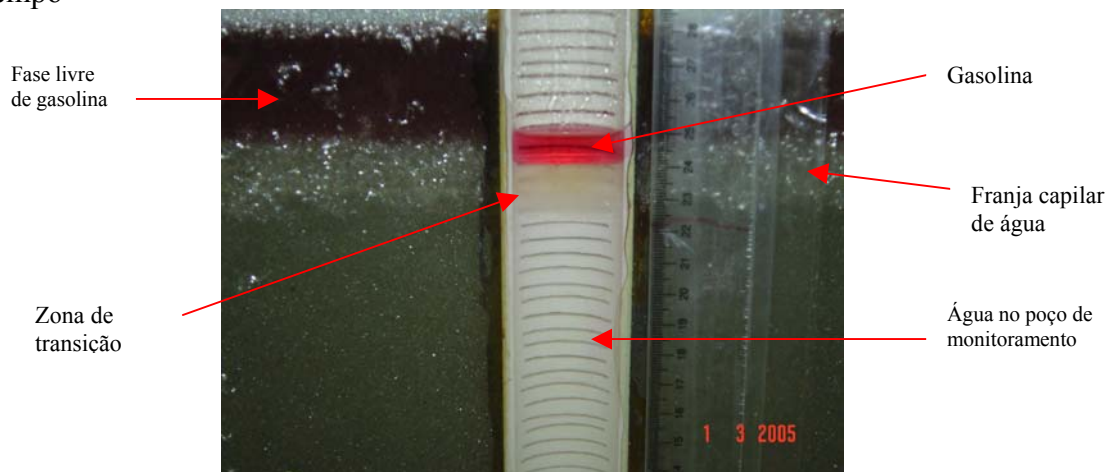
Após a terceira restituição realizada no sistema, às 22,83 horas de ensaio, a fase dissolvida volta a ser observada, porém com apenas 38,8% de sua espessura máxima alcançada, e logo desaparece com 27,13 horas de ensaio. Na quarta restituição realizada no

sistema, com a entrada de uma quantidade maior de água, a fase dissolvida não é formada, o que indica que o efeito da co-solvência, provavelmente tem mais intensidade suficiente para formar a fase dissolvida visível (gráfico 11).

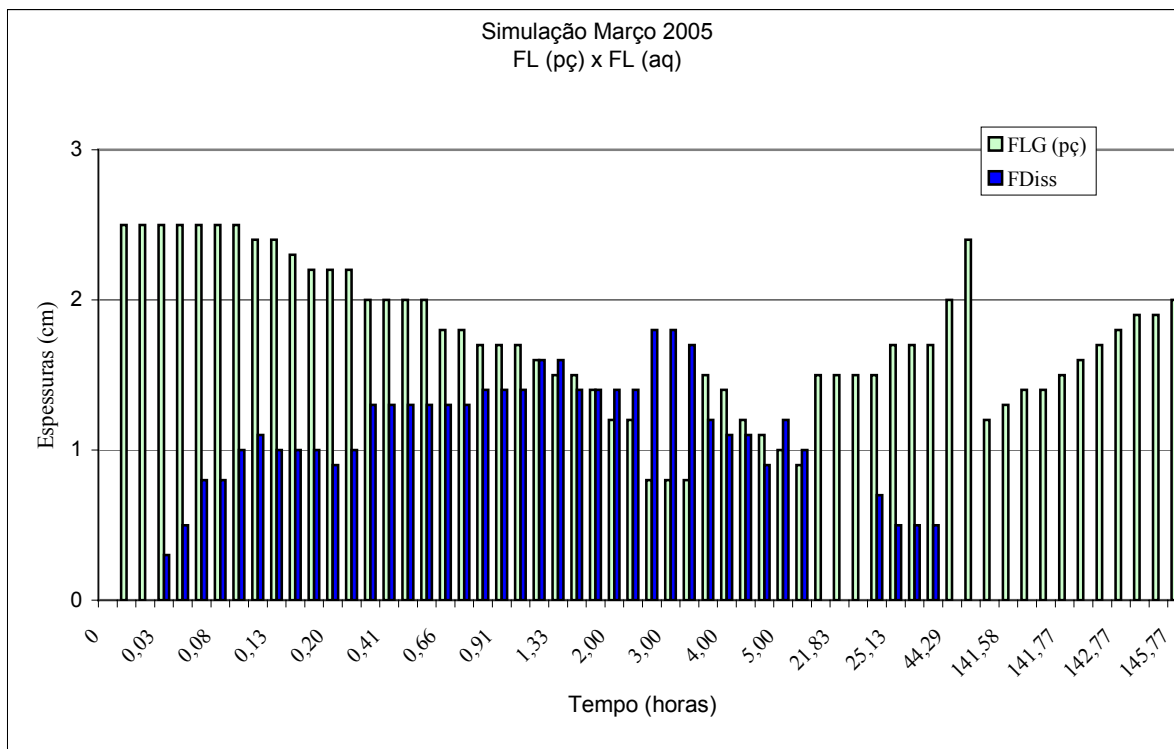
A presença da fase dissolvida no poço de monitoramento reduziu em até 68% a espessura de fase livre no poço, evidenciando o fenômeno da co-solvência causado pela presença do álcool na gasolina (figura 26).



**Gráfico 11:** Variação da espessura de fase dissolvida no poço de monitoramento em função do tempo



**Figura 26:** O efeito da co-solvência forma a zona de transição e reduz a espessura de fase livre no poço de monitoramento

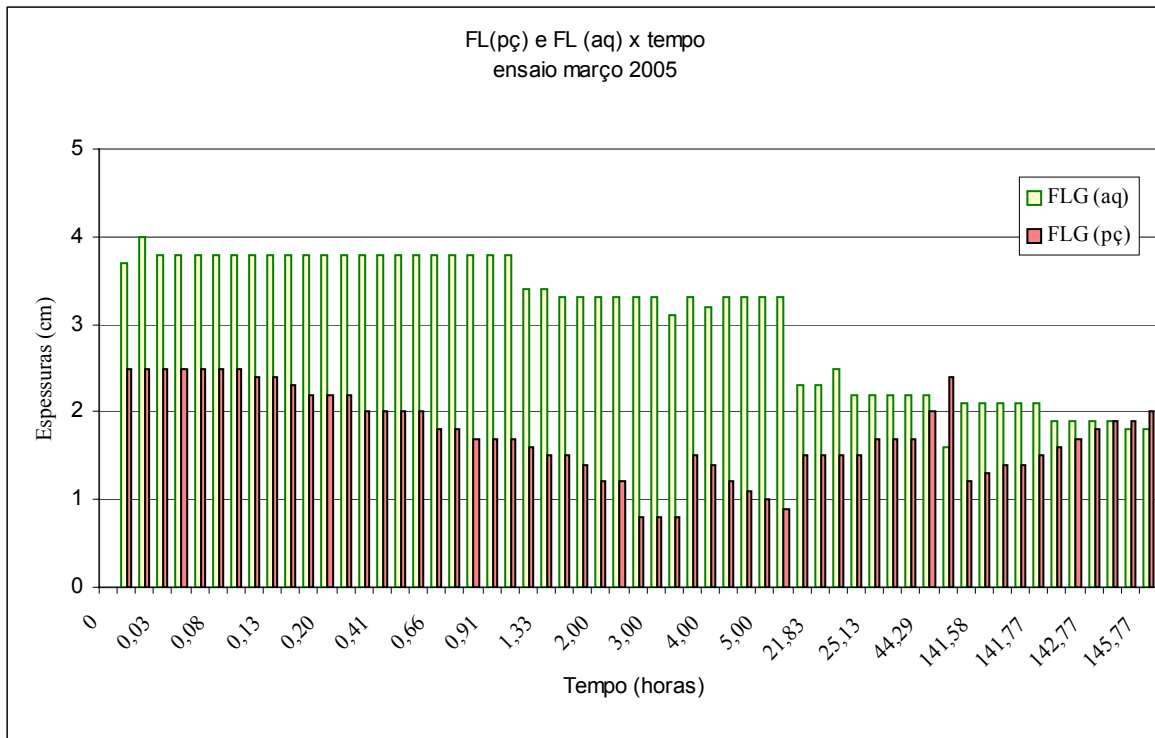


**Gráfico12:** Variação das espessuras de fase livre e fase dissolvida em função do tempo, no ensaio de março de 2005.

A partir do gráfico pode-se notar o rápido aparecimento da zona de transição, devido à presença do etanol na gasolina.

A partir da contaminação com a E-25, a espessura do contaminante no poço de monitoramento se mantém constante até aproximadamente 0,13 horas de ensaio (8 minutos) depois disso, a espessura no poço de monitoramento começa a diminuir, porém não é acompanhada por uma diminuição na espessura de gasolina no meio poroso, que só vai apresentar indícios de queda a partir de 1,33 horas de ensaio, momento em que a espessura de E-25 no poço já diminuiu 40% (Gráfico 13).

A relação entre a espessura de fase livre no poço de monitoramento e no aquífero é importante, pois ajuda a compreender como o contaminante se comporta quando é instalado um poço de monitoramento em um aquífero, além de fornecer dados sobre a quantidade de gasolina no meio poroso. A espessura de fase livre no poço de monitoramento não é a mesma existente no solo, visto que no solo agem forças capilares que não estão presentes no poço de monitoramento (Gráfico 14 e tabela 14).



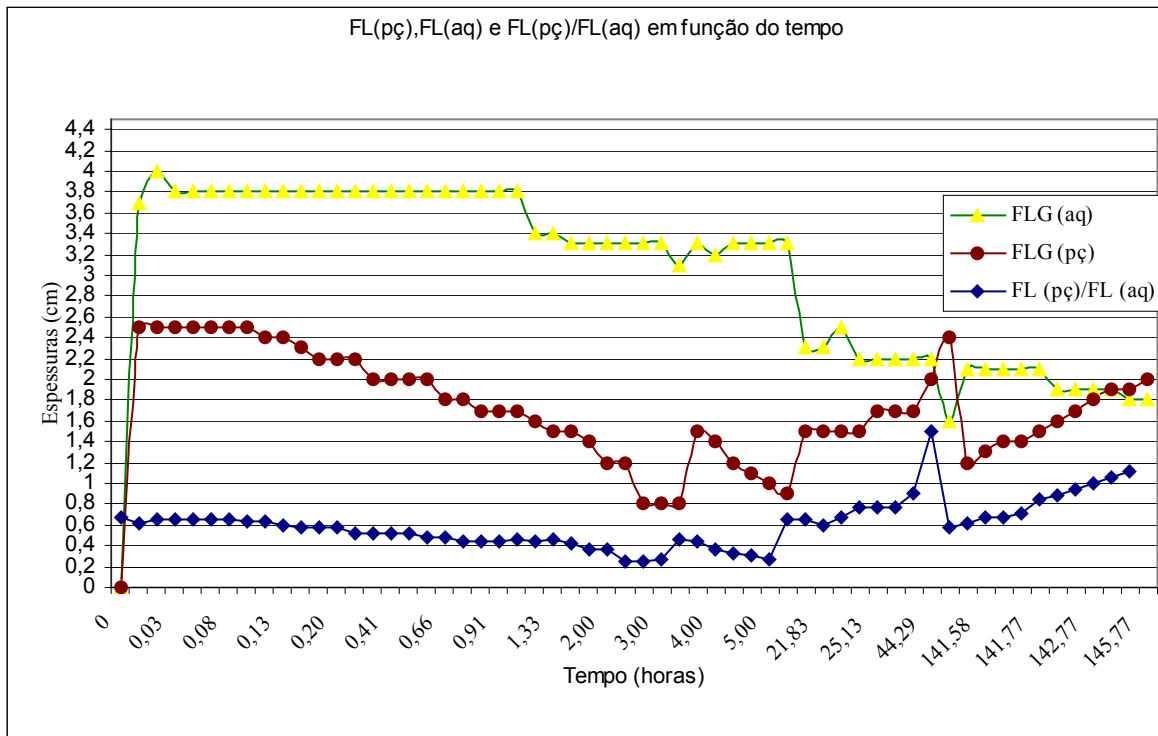
**Gráfico 13:** Comparação entre as variações das espessuras de fase livre no poço de monitoramento e no meio poroso (aquiífero), ensaio de março de 2005.

**Tabela 14:** Relação entre a espessura de fase livre no poço de monitoramento e no aquiífero.

Tempo	Relação FL (pç) / FL (aq)
0	0
0	0,675
0,02	0,625
0,03	0,656
0,05	0,656
0,06	0,656
0,08	0,656
0,10	0,656
0,11	0,631
0,13	0,631
0,15	0,605
0,16	0,578
0,20	0,578
0,25	0,578
0,33	0,526
0,41	0,526
0,50	0,526
0,58	0,526
0,66	0,473
0,75	0,473



0,83	0,447
0,91	0,447
1,00	0,447
1,16	0,470
1,33	0,441
1,50	0,454
1,66	0,424
2,00	0,363
2,33	0,363
2,66	0,242
3,00	0,242
3,33	0,260
3,66	0,454
4,00	0,437
4,33	0,363
4,66	0,333
5,00	0,303
5,33	0,272
20,83	0,652
21,83	0,652
22,83	0,600
24,13	0,681
25,13	0,772
26,13	0,772
27,13	0,772
44,29	0,910
141,45	1,500
141,53	0,571
141,58	0,620
141,61	0,666
141,69	0,666
141,77	0,714
141,94	0,842
142,44	0,894
142,77	0,947
143,11	1,000
144,94	1,055
145,77	1,111



**Gráfico 14:** A relação entre a espessura de fase livre no poço de monitoramento e no meio poroso ficou em 0,6.

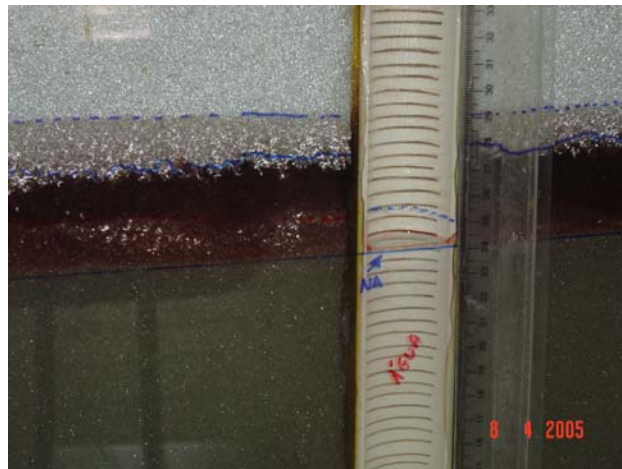
## 5.4- Ensaio 4

O quarto ensaio foi realizado de 4 a 8 de abril de 2005, e utilizou gasolina pura cedida pela companhia Petróleo Brasileiro S.A (Petrobrás). O aquário dessa vez foi colocado no Laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de Geologia da UFRJ, devido a obras de reforma no laboratório de via úmida onde foram realizados os outros ensaios.

Utilizando-se os mesmos métodos de preparação das condições pré-contaminação dos outros ensaios, com todos os parâmetros anotados, separou-se 800 ml de gasolina pura em dois beakers (400 ml em cada) e a mesma misturada com corante vermelho. Os funis foram então marcados com a mesma distância do topo da areia até o topo da franja capilar, para que a gasolina fosse injetada o mais próximo possível do topo da franja capilar de água.

A contaminação foi fotografada e filmada, com o objetivo de mostrar a evolução do contaminante durante a contaminação. Pode-se observar claramente a migração lateral e vertical da gasolina no meio poroso. Na filmagem observa-se que inicialmente a gasolina apenas migra lateralmente, ocupando o espaço acima da franja capilar de água, formando a chamada panqueca de contaminante (Ferreira, 2003).

À medida que o volume de gasolina no meio poroso aumenta, aumentando também o seu peso sobre a franja capilar, esta começa a invadir a franja capilar de água, misturando-se com a água e também expulsando parte dela (figura 27).

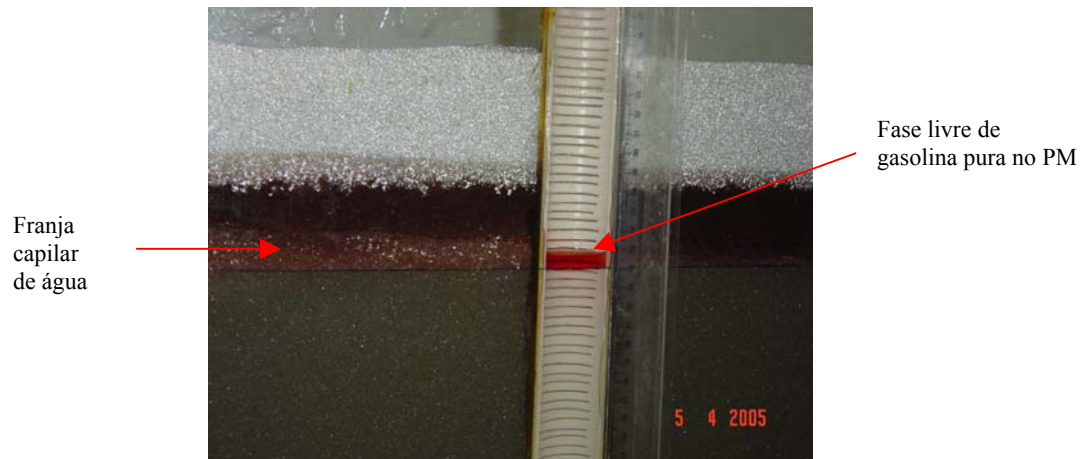


**Figura 27:** A formação da franja capilar de água não foi homogênea em todo o aquário, ficando o lado esquerdo do poço com uma franja mais bem formada do que o direito.

Durante o decorrer do experimento, pode-se notar comportamentos diferentes de outros experimentos para o comportamento da gasolina no poço de monitoramento. Quando a contaminação é executada, a espessura de gasolina no meio poroso é de 4,1 cm quando poço ainda está fechado. Com a abertura do poço e, conseqüentemente, entrada de gasolina no mesmo, a espessura no meio poroso cai para 3,2 e a espessura no poço é então de 2,3 cm. Após 10 minutos desde o início da contaminação, é realizada a primeira restituição com o objetivo de recuperar o mesmo nível de água do estado de pré-contaminação. Com a 50

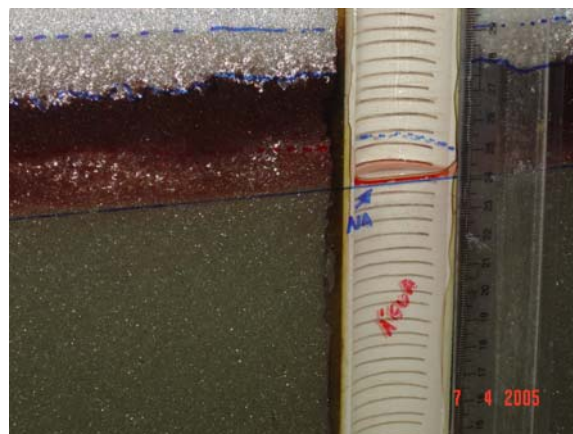
entrada de água no sistema, a espessura de gasolina no poço de monitoramento também sobe, atingindo sua espessura máxima de 2,8 cm, 5 minutos após a restituição, depois disso a espessura de gasolina no poço apenas decresce (tabela 15).

Importante também notar que, em nenhum momento do ensaio com gasolina pura, foi observada a presença da zona de transição no poço de monitoramento, característica típica da presença de etanol na gasolina. Embora não exista etanol misturado à gasolina, pode-se dizer que ocorre a transferência de massa da fase de contaminante para a fase aquosa, o que aliado a taxa de volatilização, pode ter sido responsável pela redução na espessura de gasolina no poço de monitoramento (figuras 28, 29 e 30).

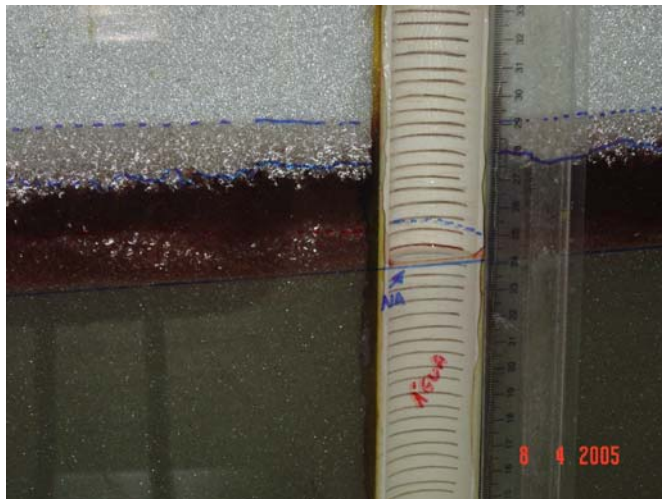


**Figura 28:** Fase livre no poço de monitoramento e no meio poroso.

No ensaio com a gasolina pura a fase livre no poço de monitoramento diminui até atingir a espessura de uma película.



**Figura 29:** A espessura de fase livre no poço de monitoramento se reduzindo a cada dia de experimento, sem a entrada de gasolina no mesmo.

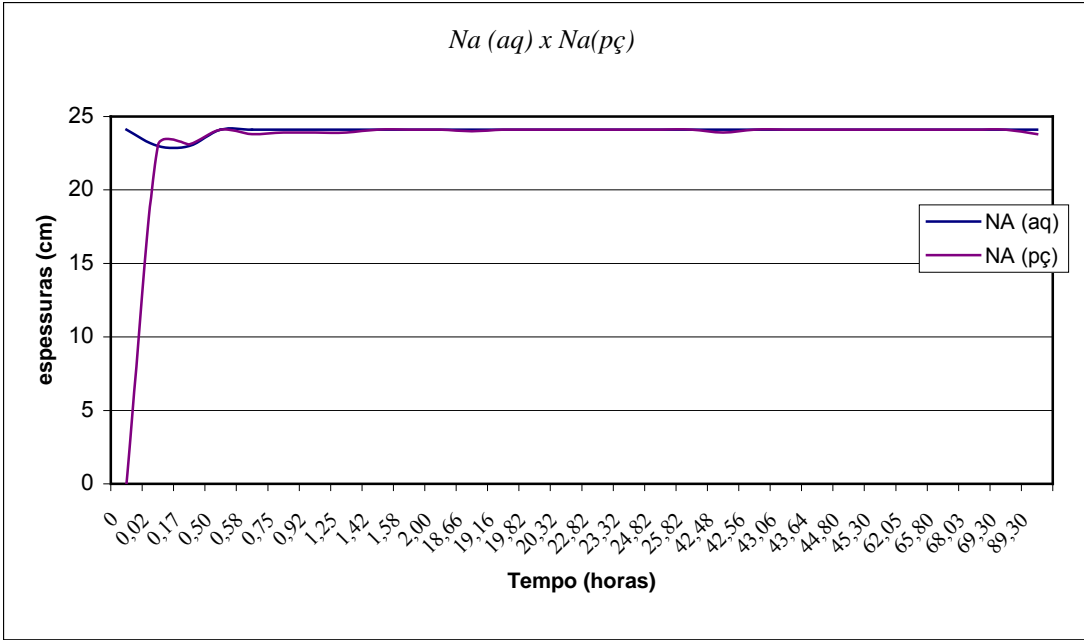


**Figura 30:** A espessura de fase livre praticamente desapareceu após 4 dias de ensaio.

Experimentos realizados por Finotti (2003) mostraram que sistemas contendo água e gasolina pura em contato apresentaram variações na tensão interfacial ao longo do tempo, indicando que a transferência de massa, um dos principais causadores de alterações nos valores de tensão interfacial, está ocorrendo. Outro motivo que também pode ser associado a variações nos valores da tensão interfacial é a taxa de volatilização de gasolina (Finotti, 2003).

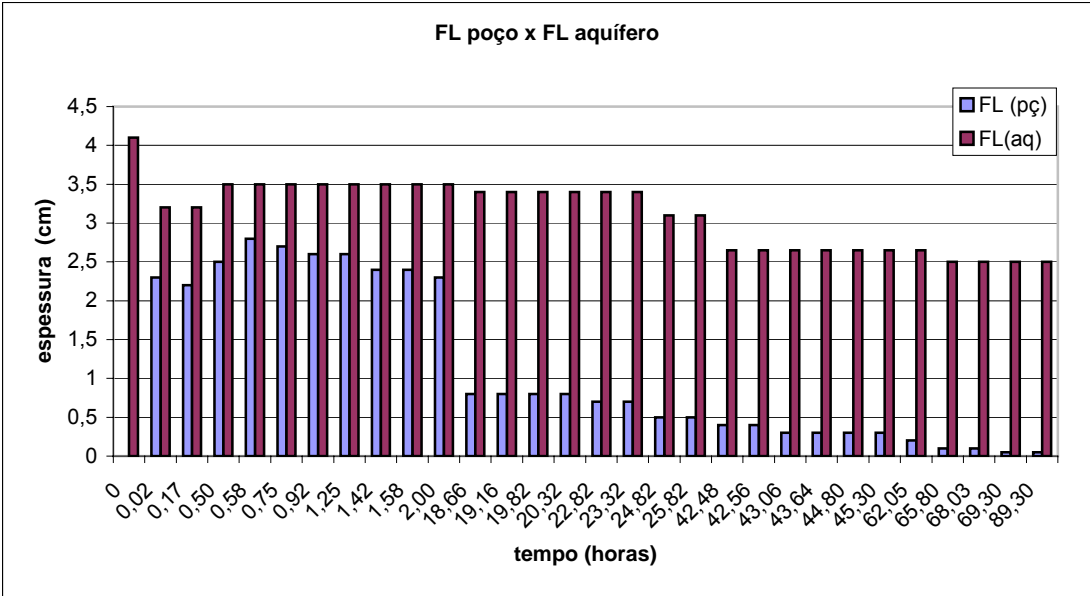
**Tabela 15:** Principais parâmetros observados no ensaio com gasolina pura

Simulado dia 4 de Abril de 2005									
Aqüífero				Poço					
NA (cm)	FCA (cm)	FL (cm)	FCGL (cm)	NA (cm)	Fdiss (cm)	FL (cm)	Hora	Tempo (horas)	data
24,1	0,9	4,1	0,3	0	0	0			4-abr-05
23	2	3,2	0,7	23	0	2,3	14:41	0,02	4-abr-05
23	2	3,2	0,7	23,1	0	2,2	14:50	0,17	4-abr-05
24,1	1,5	3,5	0,5	24,1	0	2,5	15:10	0,50	4-abr-05
24,1	1,5	3,5	0,5	23,8	0	2,8	15:15	0,58	4-abr-05
24,1	1,5	3,5	0,5	23,9	0	2,7	15:25	0,75	4-abr-05
24,1	1,5	3,5	0,5	23,9	0	2,6	15:35	0,92	4-abr-05
24,1	1,5	3,5	0,5	23,9	0	2,6	15:55	1,25	4-abr-05
24,1	1,5	3,5	0,5	24,1	0	2,4	16:05	1,42	4-abr-05
24,1	1,5	3,5	0,5	24,1	0	2,4	16:15	1,58	4-abr-05
24,1	1,5	3,5	0,5	24,1	0	2,3	16:40	2,00	4-abr-05
24,1	1,0	3,4	0,4	24	0	0,8	09:20	18,66	5-abr-05
24,1	1,0	3,4	0,4	24,1	0	0,8	09:50	19,16	5-abr-05
24,1	1,0	3,4	0,4	24,1	0	0,8	10:30	19,82	5-abr-05
24,1	1,0	3,4	0,4	24,1	0	0,8	11:00	20,32	5-abr-05
24,1	1,0	3,4	0,4	24,1	0	0,7	13:30	22,82	5-abr-05
24,1	1,0	3,4	0,4	24,1	0	0,7	14:00	23,32	5-abr-05
24,1	1,0	3,1	0,4	24,1	0	0,5	15:30	24,82	5-abr-05
24,1	1,0	3,1	0,4	24,1	0	0,5	16:30	25,82	5-abr-05
24,1	1,0	2,65	0,4	23,9	0	0,4	09:10	42,48	6-abr-05
24,1	1,0	2,65	0,4	24,1	0	0,4	09:15	42,56	6-abr-05
24,1	1,0	2,65	0,4	24,1	0	0,3	09:45	43,06	6-abr-05
24,1	1,0	2,65	0,4	24,1	0	0,3	11:20	43,64	6-abr-05
24,1	1,0	2,65	0,4	24,1	0	0,3	12:30	44,80	6-abr-05
24,1	1,0	2,65	0,4	24,1	0	0,3	13:00	45,30	6-abr-05
24,1	1,0	2,65	0,6	24,1	0	0,2	08:45	62,05	7-abr-05
24,1	1,0	2,5	0,6	24,1	0	0,1	12:30	65,80	7-abr-05
24,1	1,0	2,5	0,6	24,1	0	0,1	14:44	68,03	7-abr-05
24,1	1,0	2,5	0,6	24,1	0	0,05	16:00	69,30	7-abr-05
24,1	1,0	2,5	0	23,8	0	0,05	12:00	89,30	8-abr-05



**Gráfico 15:** Variação dos níveis d'água no poço de monitoramento e no aquífero.

O nível d'água no aquífero e no poço de monitoramento se mantiveram praticamente constantes, sendo necessário realizar apenas uma restituição, nove minutos após o início do ensaio, (marcado em vermelho na tabela 15).



**Gráfico 16:** Variação das espessuras de fase livre no poço de monitoramento e no aquífero ao longo do tempo.

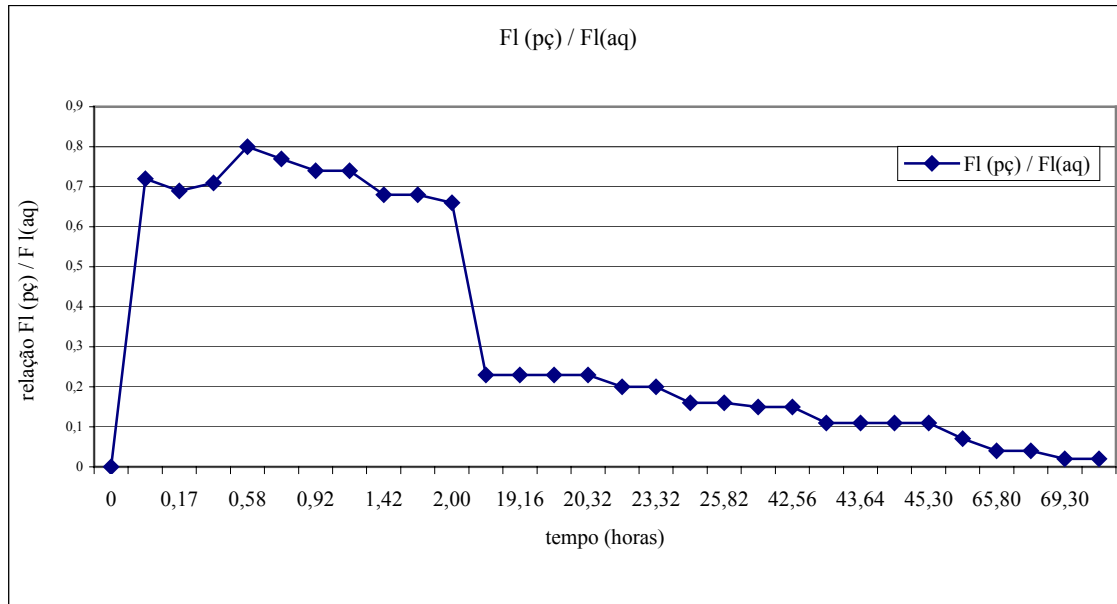
A queda na espessura da fase livre de um dia para outro de experimento é muito elevada devido principalmente à evaporação, juntamente com a dissolução do contaminante na água.

**Tabela 16:** Variação da relação Fl (pç) por Fl (aq) no tempo

Variação da relação Fl (pç) por Fl (aq) no tempo		
Fl (pç)/Fl (aq)	Tempo (horas)	data
0	0	4-abr-05
0,72	0,02	4-abr-05
0,69	0,17	4-abr-05
0,71	0,50	4-abr-05
0,8	0,58	4-abr-05
0,77	0,75	4-abr-05
0,74	0,92	4-abr-05
0,74	1,25	4-abr-05
0,68	1,42	4-abr-05
0,68	1,58	4-abr-05
0,66	2,00	4-abr-05
0,23	18,66	5-abr-05
0,23	19,16	5-abr-05
0,23	19,82	5-abr-05
0,23	20,32	5-abr-05
0,20	22,82	5-abr-05
0,20	23,32	5-abr-05
0,16	24,82	5-abr-05
0,16	25,82	5-abr-05
0,15	42,48	6-abr-05
0,15	42,56	6-abr-05
0,11	43,06	6-abr-05
0,11	43,64	6-abr-05
0,11	44,80	6-abr-05
0,11	45,30	6-abr-05
0,07	62,05	7-abr-05
0,04	65,80	7-abr-05
0,04	68,03	7-abr-05
0,02	69,30	7-abr-05
0,02	89,30	8-abr-05

A relação entre as espessuras de fase livre no poço de monitoramento e no meio poroso diminui ao longo do tempo. No quarto ensaio, realizado com gasolina pura, não houve migração do contaminante para o poço de monitoramento depois de cessada a injeção de gasolina.





**Gráfico 17:** Variação da relação entre fase livre no poço de monitoramento e a espessura de fase livre no aquífero.

O valor médio da relação entre as duas espessuras comparadas foi de 0,34, sendo o maior valor de 0,8, após a restituição do sistema, e o menor de 0,02 no final do experimento.

## 6- Discussão dos resultados

- Observando os resultados dos ensaios tanto para gasolina pura quanto para gasolina com etanol (25%), pode-se observar que alguns resultados foram compatíveis com experimentos realizados por outros autores, Ferreira (2003) e Finotti (2003), enquanto outros diferem totalmente dos resultados esperados.

- Em relação ao início da contaminação, quando a gasolina ainda está sendo injetada, o que se pôde observar é que a gasolina migra preferencialmente para as laterais, como se estivesse flutuando sobre a franja capilar de água, porém à medida que o volume de gasolina acima da franja começa a aumentar muito, o que se observa é uma invasão da gasolina na franja capilar de água. Van Dan (1967) já havia relatado a influência do peso da coluna de fase livre acima da franja capilar que seria comprimida apenas pelo peso do contaminante.

Outros autores como Concawe (1979) ainda explicam que, quando a gasolina se acumula acima da franja capilar, ela se espalha lateralmente porque, à medida que se acumula nessa região, ela exerce uma força hidrostática que pressiona e rebaixa a superfície livre de água, e as forças gravitacionais agem no sentido de restaurar o nível de água formando, assim, a chamada panqueca de óleo que é forçada a migrar lateralmente.

- Os ensaios realizados nessa monografia, entretanto não podem afirmar que houve um rebaixamento do nível d'água no poço de monitoramento à medida que a gasolina ia sendo injetada, mesmo porque a contaminação era realizada com o poço de monitoramento fechado. O que se pode concluir é que realmente a gasolina invade a franja capilar de água após a contaminação, e que o tempo para que essa invasão ocorra é diferente nos dois tipos de gasolina.

Na gasolina com etanol, o tempo para que a invasão fosse notada foi de apenas 1 minuto de ensaio, ou seja, quase que instantaneamente, o que pode ser explicado pela presença do etanol na gasolina que aumenta sua mobilidade, devido a diminuição da viscosidade e da tensão interfacial, enquanto que aproximadamente 10 minutos depois que foi realizada a contaminação com gasolina pura é que se pôde notar um aumento na espessura real de gasolina, devido à invasão da gasolina na franja capilar de água, ou seja, um tempo dez vezes maior do que na gasolina com etanol.

- A gasolina E-25 utilizada foi comprada em um posto revendedor da Petrobrás localizado em frente ao Cenpes, na ilha do fundão, de modo que a gasolina produzida pela Petrobrás segue um padrão nacional, e em seus site oficial é possível encontrar especificações que afirmam que a mistura de etanol na gasolina para o ano de 2005 é de 25% ([www.br.com.br](http://www.br.com.br)).

- Em todos os ensaios realizados com a gasolina E-25 foi observada a presença da zona de transição no poço de monitoramento, por volta de 2 a 10 minutos após a contaminação. A zona de transição é formada devido à presença do etanol na gasolina, isto porque o etanol é uma substância hidrofílica, ou seja, logo que em contato com a água já inicia seu processo de solubilização, passando da fase da gasolina para a água (Finotti, 2003).

Segundo Ferreira (2000) e Finotti (2003) e o álcool funciona como um co-solvente aumentando a solubilidade dos compostos como BTEX em água. Corseuil realizou experimentos com gasolina pura e com gasolina comercial brasileira contendo 20% de etanol. Os resultados mostraram que, com o aumento da fração do co-solvente na água de 0,93% para 15,8%, as solubilidades de alguns componentes da gasolina como o benzeno, tolueno e o xileno foram aumentados em 67%, 89% e 90% respectivamente, indicando um quadro de extrema preocupação à medida que o uso do álcool no mercado brasileiro de combustíveis esta aumentando a cada ano.

- A presença do etanol mostrou resultados muito semelhantes nos experimento com E-25 realizados em Dezembro de 2004 e em Março de 2005. No primeiro ensaio realizado, foi observada uma redução de até 70% na espessura de fase livre no poço de monitoramento juntamente com o aumento da zona de transição (fase dissolvida), evidenciando a dissolução de componentes da gasolina como os BTEX. No ensaio de Março de 2005 a presença da fase dissolvida no poço de monitoramento reduziu em até 68% a espessura de fase livre no poço, evidenciando o fenômeno da co-solvência causado pela presença do álcool na gasolina.

O ensaio realizado com gasolina pura não apresentou, em nenhum momento, a presença da zona de transição, porém isso não significa que não estava ocorrendo transferência de massa entre a gasolina pura e a água, ou seja, que componentes da gasolina não estivessem se solubilizando, passando da fase gasolina para a fase aquosa.

Os resultados de experimentos realizados por Finotti (2003), para determinar a variação da tensão interfacial em sistemas equilibrados de gasolina pura e água, mostraram que mesmo nesses sistemas, a tensão interfacial variou ao longo do tempo, e seu comportamento pode estar relacionado com o envelhecimento da interface ou a evaporação.

Aliado à transferência de massa por dissolução de componentes, a evaporação e o envelhecimento da interface explicariam a queda acentuada na espessura de fase livre de gasolina pura após 18,66 horas de ensaio. No caso da E-25, a primeira grande queda no valor das espessuras foi percebido 3 horas após o início do ensaio, velocidade seis vezes maior, mais uma vez evidenciando que a presença do álcool acentua os efeitos de dissolução.

- O comportamento de contaminante que mais se diferenciou dos demais ensaios foi em relação à espessura de fase livre de gasolina pura no poço de monitoramento. Após a contaminação, a espessura é de aproximadamente 72% da espessura real, esse valor chega a aumentar para 80% com a entrada de água no sistema, devido a uma restituição do nível d'água no aquífero. Com o passar do tempo não ocorre mais entrada de gasolina no poço de monitoramento, e a espessura vai diminuindo até atingir o valor de uma película (0.1 mm).

A entrada de gasolina em um poço de monitoramento é explicada pela diferença de potencial entre a posição do contaminante e do topo do nível d'água no poço. Para o caso de poços situados na zona de infiltração e com contaminante móvel contido na camada acima da zona capilar, o potencial será mais alto que no poço de monitoramento, conseqüentemente, a gasolina vai entrar no poço de observação e flutuar no topo do nível de água.

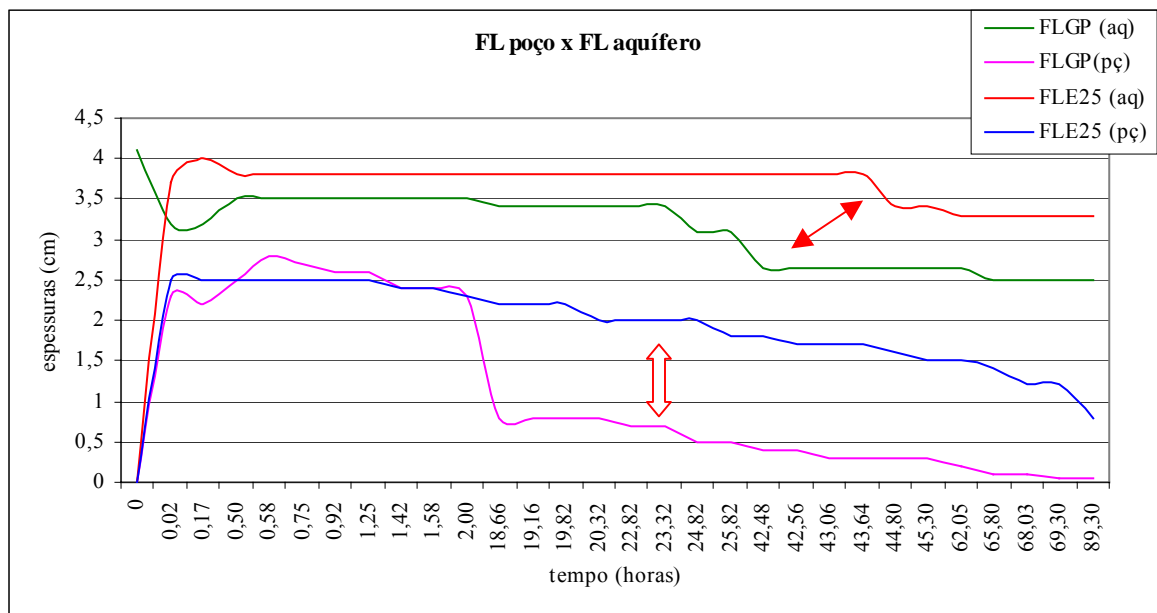
Quando a injeção de gasolina é cessada, uma camada de gasolina pura é formada acima da franja capilar de água no meio poroso. A tensão interfacial entre as esferas de vidro e a gasolina pura passa a agir sobre as moléculas de ambos os materiais. Além desse

fato a gasolina pura possui uma viscosidade maior que a gasolina com etanol, o que diminui sua mobilidade.

Estudos feitos por Hypólito (2003), comprovaram que a passagem de gasolina pura por uma zona de solo quartzoso não saturado de granulometria variando entre as peneiras #40 e #60 da ASTM é 30% mais lenta que a passagem de gasolina com 20% de etanol, além disso, a quantidade de gasolina recuperada após seus ensaios foi maior na passagem da gasolina com etanol. Como se trata de uma zona não saturada, pode-se afirmar que a quantidade de gasolina que não passou pelo solo ficou presa nos seus poros, sob a ação de forças capilares (tensão interfacial) capazes de vencer a força da gravidade.

- A relação entre as espessuras de gasolina com etanol no poço de monitoramento e no meio poroso variou entre 0,23 e 0,88 para o ensaio de Dezembro de 2004, e entre 0,24 e 0,67 para o ensaio de Março de 2005. Enquanto esses valores mudam constantemente nos experimentos com gasolina E-25, no experimento com gasolina pura o valor aumenta de 0,72 para 0,80, e volta a diminuir até atingir 0,02 no final do experimento.

Ensaio realizados com gasolina pura em outros experimentos, apresentaram valores diferentes de espessura de gasolina no poço de monitoramento, enquanto que os experimentos com gasolina com etanol foram mais semelhantes, mesmo com condições de ensaio diferentes em cada um deles.



**Gráfico 18:** Comparação entre as espessuras de fase livre de gasolina pura (FLGP) e de gasolina com etanol (FLE25), no poço de monitoramento e no meio poroso. A partir de 89 horas somente o ensaio com gasolina E-25 continua.

- O gráfico 18 mostra uma comparação entre as espessuras de gasolina pura, no poço de monitoramento e no meio poroso (FLGP), e de gasolina com etanol (FLE25). Pode-se notar que, após 18 horas de ensaio a velocidade de diminuição das espessuras de gasolina pura, e gasolina com etanol no poço de monitoramento é muito semelhante.

O comportamento das espessuras de fase livre de gasolina pura, e de gasolina com etanol no meio poroso, também apresenta semelhanças, ambos se mantêm estáveis por mais tempo de ensaio, e suas reduções de espessuras também são muito parecidas.

• Utilizando quatro colunas preenchidas com material arenoso fino à médio, Finotti (2003) provocou a contaminação em dois deles com gasolina pura e nos outros dois com gasolina misturada com 24% de etanol, em trabalho semelhante Ferreira (2003) utilizou duas colunas preenchidas com material fino a médio também as contaminou, uma com gasolina pura e a outra com gasolina E-20. A partir da tabela abaixo podemos notar que a relação entre as espessuras de gasolina no poço de monitoramento e no meio poroso é muito diferente para os dois tipos de gasolina, e que alguns dados se assemelham com os dados deste trabalho (tabela 17).

**Tabela 17:** Comparação entre os valores das relações de gasolina no poço de monitoramento e no meio poroso após 24 hrs de ensaio

Comparação entre os valores das relações de gasolina no poço de monitoramento e no meio poroso após 24 hrs de ensaio								
	Finotti (2003)				Ferreira (2003)		Este monografia	
	Coluna 1 gasolina E-24	Coluna 2 gasolina pura	Coluna 3 gasolina E-24	Coluna 4 gasolina pura	Coluna 1 gasolina pura	Coluna 2 gasolina E -20	Aquário gasolina E-25	Aquário gasolina pura
Valor da relação	0,678	2,3	0,54	3,16	4,3	x	0,681	0,16

As medidas de espessuras de contaminantes em poços de monitoramento que são mais importantes para as empresas de meio ambiente são das primeiras 24 horas, por isso a tabela acima comparou experimentos diferentes com 24 horas de ensaio.

Interessante notar que os valores para a gasolina com aproximadamente 25% de etanol são muito parecidos para as leituras feitas com 24 horas de ensaio, entretanto para a gasolina com 20% de etanol (E-20), ainda não havia sido observada a sua presença no poço de monitoramento.

Ainda que tenham sido utilizados diferentes tipos de solos, os valores para a relação da espessura de gasolina com etanol (24% e 25%), para os ensaios desta monografia, e de outras pesquisas foram muito semelhantes, variando entre 54% e 68%. Esse fato pode ser atribuído a presença do etanol, que reduz a tensão interfacial entre a gasolina e os sólidos, e também aumenta sua mobilidade.

A relação entre a espessura de gasolina pura, no poço de monitoramento e no meio poroso, foram diferentes, em todos os ensaios realizados, tanto desta monografia, quanto de trabalhos semelhantes. Dessa forma a relação entre as espessuras de gasolina com etanol no poço de monitoramento e no meio poroso depende menos das propriedades do solo do que a gasolina pura

Segundo Ferreira (2003), a gasolina com etanol demorou a entrar no poço de monitoramento, porque a gasolina ainda estaria sobre carga negativa no meio poroso, entretanto, foram feitas coletas que mostraram a presença de etanol e BTEX na água do poço de monitoramento, mesmo sem a presença de coluna de gasolina no poço, o que significa que embora a gasolina E-20 ainda não fosse visível no poço de monitoramento, ela já estava sofrendo o processo de dissolução.

No experimento de Ferreira (2003), a gasolina com etanol só foi medida no poço de monitoramento 286 horas após a contaminação e o valor da relação entre a gasolina no poço e a gasolina no meio poroso foi de 1,3, valor semelhante ao encontrado nesta monografia quando após 145 horas de ensaio a mesma relação alcançou o valor de 1,1.

A gasolina pura apresentou valores diferentes em todos os experimentos, entretanto a maior diferença foi em relação ao experimento realizado no aquário, onde não ocorreu a mesma mobilidade de gasolina que nos outros experimentos.

## 7- Conclusões

- O uso de modelos físicos para observação de contaminações em meios porosos e poços de monitoramento é uma ferramenta importante, pois permite ao pesquisador acompanhar com mais detalhe o comportamento do fluido.

- Os dados desse trabalho não devem ser considerados como absolutos, pois como já foi explicado, as leis que governam o comportamento dos fluidos em meios porosos saturados e insaturados são bastante complexas, e a quantidade de parâmetros que influenciam os resultados também é muito grande.

- É necessário que os trabalhos sobre contaminações de aquíferos por derivados de hidrocarbonetos continuem avançando, para que assim as lacunas deixadas por experimentos anteriores possam ser preenchidas e explicadas.

- A franja capilar é invadida tanto pela gasolina pura quanto pela gasolina com etanol, sendo a gasolina com etanol, em média, dez vezes mais rápida nesse processo, fato atribuído a presença de etanol na sua mistura, que aumenta a solubilidade de elementos da gasolina e sua permeabilidade relativa.

- A presença do etanol na gasolina causa um efeito devastador na natureza dos aquíferos, por ser um composto hidrofílico-quando em contato com a água o álcool rapidamente se solubiliza se distribuindo entre a fase gasolina e a fase aquosa. Essa mistura de água + etanol + gasolina provoca um fenômeno chamado de co-solvência, que aumenta significativamente a solubilidade de componentes da gasolina, como o benzeno, o tolueno, etilbenzeno e o xileno (BTEX).

- A redução dos volumes de fase livre de gasolina devido à presença do etanol chegou a atingir 70% entretanto, o que se passa a ter é um quadro preocupante, pois deixa-se de ter uma contaminação visível e para se ter uma contaminação não menos perigosa, porém invisível.

- Nos ensaios com E-25, a zona de transição formada pela presença do etanol na gasolina aparece logo no início, mostrando que o efeito da co-solvência é muito rápido entretanto, a zona de transição desaparece após 21,83 horas no experimento de março de 2005, mas seu desaparecimento não significa que a transferência de massa entre as fases de gasolina e de água tenha cessado, apenas nenhuma evidência visual indica tal fenômeno.

Pôde ser observado também, no mesmo ensaio, que a entrada de água no sistema devido à restituição, realizada às 22,83 horas, faz com que a zona de transição volte a aparecer, porém, com apenas 38,8% de sua espessura máxima alcançada, e logo desaparece com 27,13 horas de ensaio. Com isso duas hipóteses são feitas:

A primeira, de que em sistemas fechados onde não há entrada de água, é atingido um equilíbrio entre os componentes (gasolina, etanol e água), e apenas com a entrada de mais água esse equilíbrio seria quebrado permitindo a retomada dos processos de dissolução.

A segunda seria de que a gasolina presente no poço de monitoramento já teria perdido para o sistema toda a quantidade de etanol e de componentes possível – ou seja, o sistema atingiu o equilíbrio, e com a restituição do nível d'água do aquífero mais gasolina seria expulsa do meio poroso entrando no poço, com isso o fenômeno da co-solvência seria novamente ativado.

- A evolução da fase livre no meio poroso e no poço para os experimentos com gasolina pura e com E25, demonstrou uma diminuição gradual da espessura no poço. As espessuras no aquífero para os dois experimentos mostraram uma tendência mais estável para a espessura de gasolina. Esse fato é explicado porque a volatilização e a dissolução no poço são mais rápidas, pois não há obstáculos representados pelos sólidos (aquífero).

- As diferenças nas leituras das espessuras aparentes para a gasolina pura deve estar associada às diferenças de material e no grau de empacotamento, de saturação e de drenagem das colunas, que apesar de muitos cuidados, não são iguais.

- Os experimentos realizados mostraram o conhecimento das características do solo e do fluido contaminante são fundamentais para se fazer estimativas da espessura real de combustível.

- Analisando toda a variação da espessura de gasolina E-25 no poço de monitoramento durante o ensaio de março de 2005, pode-se afirmar que, em nenhum momento do ensaio, houve situação de equilíbrio entre as fases gasolina, água e etanol. Algumas razões foram atribuídas a isso como o efeito da evaporação, a entrada de água no sistema devido às restituições e também devido ao fenômeno da co-solvência.

- A espessura de gasolina pura no poço de monitoramento reduziu-se até 1 mm de espessura após aproximadamente 89 horas de ensaio, devido, talvez a alguma dissolução e volatilização. Após a contaminação não ocorreu mais entrada de gasolina no poço. Esse fato pode ser atribuído a formação de uma fase residual de gasolina no meio poroso. A menor mobilidade da gasolina pura pode ter sido a responsável pela formação da fase residual de gasolina no meio poroso (zona vadosa).

- Determinar a espessura de um contaminante derivado de hidrocarboneto no solo não é uma tarefa simples, a quantidade de fatores que atuam no comportamento desse fluido é muito grande, mesmo com inúmeras formulações matemáticas e diferentes trabalhos publicados, ainda não se chegou a um consenso que explique o comportamento desses contaminantes nos meios porosos.

## 8 – Trabalhos Futuros

Como existe uma grande diferença no comportamento da gasolina com etanol e da gasolina pura quando esta entra em contato com a água, sugere-se que, nos trabalhos futuros sejam feitas análises de amostras de água tanto para o poço de monitoramento quanto para o meio poroso, podendo assim determinar a quantidade de compostos dos diferentes tipos de gasolina que se dissolveu na água.

Os experimentos realizados neste trabalho utilizaram a mesma granulometria para simular o meio poroso, sugiro que, nos próximos trabalhos utilizem diferentes granulometrias, se possível sem mudar o material a ser utilizado, assim a importância da variação granulométrica poderá ser analisada.



## 9– Bibliografia

**Agência Nacional do Petróleo** ([www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br)), acessado em 14 março de 2005

Béraud, J.F.; Leconte, P. , Mariotti, C. , **Handbook of Diagnostic Procedures for Petroleum Contaminated Sites**, Ed. Wiley, England, pp 41-82, 1997.

Corseuil, H. X.; Martins, M. D. M. **Efeitos Causados pela Mistura de Gasolina e Álcool em Águas Subterrâneas**. Bol. Téc. PETROBRÁS, Rio de Janeiro, 41 (3/4): 133-138 jul/dez -1998.

Ferreira, S. M. **Relação Entre a Espessura Real e Aparente da Gasolina com Etanol e da gasolina Pura em Colunas de Laboratório** – Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo (USP) 2003.

Finotti, A. R. **Efeitos da Transferência de Massa na Relação Matemática Entre Espessuras Real e Aparente em Fase Livre de Gasolina com Etanol nas Contaminações Subterrâneas**, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 190 p, 2003.

Feitosa, F. A C.; Filho, J. M. **Hidrogeologia Conceitos e Aplicações** 2<sup>a</sup> edição CPRM/REFO, Fortaleza , 391 p, 2000.

Fetter, C. W **Contaminant Hidrogeology**. 2<sup>a</sup> edição, New York, macmillan 500 p, 1999.

Hypólito, J. P., **Simulação Física da Infiltração de Gasolina Pura e da sua Mistura com 20% de Etanol em uma Areia Não Saturada**, Monografia de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Geologia, 61 p, (UFRJ) 2003.

Oliveira, A. M. S.; Brito, S. N. A., **Geologia de Engenharia** , ABGE, Ed. Páginas e letras, São Paulo 582 p. .1998.

Penner, G. C., **Estudos Laboratoriais da Contaminação do Solo por Gasolina com o Uso de Detetor de Fotoionização**, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC –USP), 132p 2000.

Portal Br ([www.br.com.br](http://www.br.com.br)) acessado em 10 de março de 2005

Projeto Petrobrás – **Remediação de Áreas Contaminadas por Derramamentos de Combustível**, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – REMAS – ([www.remas.ufsc.br/projeto\\_petrobras.html](http://www.remas.ufsc.br/projeto_petrobras.html)) acessado em 8 de março de 2005.

Universidade de São Paulo <http://educar.sc.usp.br/ciencias/recursos/agua.html>). Acessado em março de 2005.

## 10 – Anexos

### Ensaio Granulométrico

O ensaio granulométrico das esferas de vidro revelou que 99,36% das esferas ficaram retidas na peneira de número 30 ASTM e as porcentagens restantes ficaram entre as peneiras 35 e 40 ASTM. O material utilizado corresponde a uma areia média.

## LEGENDA

**Tabela 18:** Legenda das tabelas dessa monografia

Sigla	Significado
(aq)	Aqüífero
E-20	Gasolina com 20% de etanol
E-24	Gasolina com 24% de etanol
E-25	Gasolina com 25% de etanol
FCA	Franja capilar de água
FCG	Franja capilar de gasolina
FD ou Fdiss	Fase dissolvida (visível)
FL	Fase livre
FLE25	Fase livre de gasolina E-25
FLG	Fase livre de gasolina
FLGP	Fase livre de gasolina pura
N.A	Nível d'água
(pç)	Poço de monitoramento